

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Civil

INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA EN EL COMPORTAMIENTO DE PUENTES FORMADOS POR DOS VIGAS CAJÓN

Autor: Carmen Marín Rodríguez

Tutor: Antonio Martínez de la Concha

Grupo de Estructuras
Dep. Teoría de Mecánica de Medios Continuos y
Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla



Sevilla, 2017



Trabajo de Fin de Grado
Ingeniería Civil

INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA EN EL COMPORTAMIENTO DE PUENTES FORMADOS POR DOS VIGAS CAJÓN

Autor:

Carmen Marín Rodríguez

Tutor:

Antonio Martínez de la Concha

Profesor titular

Dep. Teoría de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Trabajo Fin de Grado: INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA EN EL COMPORTAMIENTO DE PUENTES
FORMADOS POR DOS VIGAS CAJÓN

Autor: Carmen Marín Rodríguez

Tutor: Antonio Martínez de la Concha

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

*A mi hermana Cristina, a mis
padres, José Enrique y María del
Carmen.*

*A mis amigos de la escuela y a
mis profesores, especialmente a
mi tutor Antonio Martínez de la
Concha.*

Agradecimientos

Aunque éste sea uno de los primeros capítulos que aparecen en este trabajo de fin de grado, ha sido el último que se ha escrito, porbablemente por la dificultad. No por no saber a quien agradecerle llegados a este punto de mi carrera como estudiante, sino por no poder recoger en un trozo de papel los sentimientos que tengo hacia estas personas y sin las cuales, esto habría sido mucho más difícil.

En primer lugar, tengo que darle las gracias a mi familia: mis padres, José Enrique y M^a del Carmen, y a mi hermana, Cristina. Ellos han sido quienes han tenido que aguantar mi mal humor en exámenes, cuando no obtenía los resultados que esperaba, o en momentos de agobio cuando no daba tiempo a entregar éste o aquél trabajo. Sin embargo, han sabido comprenderme en todo momento, estando cerca cuando me hacía falta o, por el contrario, alejándose cuando necesitaba espacio. Por ello, aprovecho este capítulo de mi TFG para decirles que muchas gracias por todo, y que no podría haberme tocado una familia mejor.

Por supuesto, no podría dejar de lado a mis civiles. Personas que empezaron siendo simples compañeros de clase, de los que más de la mitad no conocía ni su nombre, son a día de hoy verdaderos amigos que sé que durarán toda la vida. Ellos han estado ahí en todo momento, y nos hemos apoyado los unos en los otros en los momentos de dificultad ya que, ¿quién mejor que uno de nosotros para comprender nuestros problemas y nuestros momentos de bajón? Para unos apuntes, un problema que no te sale, o simplemente para tomar un café y charlar, podías contar con cualquiera de ellos en todo momento. Y aquí, me gustaría nombrar a mis 'Morenitos', personas muy especiales que sé que me he llevado para toda la vida, y sin las cuales, esto no habría sido lo mismo.

También tengo mucho que agradecer a mis profesores, los cuales me han enseñado todo lo que sé a día de hoy sobre la Ingeniería. Especialmente, me gustaría agradecerse a mi tutor, Antonio Martínez de la Concha y al profesor Héctor Cifuentes Bulté, quienes me han transmitido sus conocimientos sobre las estructuras y me han enseñado a entenderlas y a decantarme por esta rama de la Ingeniería Civil, la cual me gusta tanto.

Por último, pero no por ello menos importante (ni mucho menos), decirle a mi amiga Palma Sánchez que gracias por todo: por las noches en vela, por aguantar mis agobios y saber tranquilizarme, por los cafés interminables y, por supuesto, también por los buenos momentos. Gracias por ser la mejor amiga que se puede tener.

Carmen Marín Rodríguez

Estudiante de Ingeniería Civil

Sevilla, 2017

Resumen

El presente trabajo trata sobre el comportamiento de los puentes formados por dos vigas cajón. En un primer lugar, se ha estudiado el comportamiento de un puente que se ha tomado como modelo de referencia, reproduciendo el estudio que realiza D. Javier Manterola en su libro ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo I’.

Posteriormente, una vez corroborados los resultados obtenidos en el modelo de referencia con los obtenidos por el autor en su estudio, se ha procedido al análisis de varios puentes, definiendo cuatro casos: variación de la luz del puente, variación de la inclinación de las almas, variación del ancho de los cajones y variación de la separación entre cajones. En cada caso, se han estudiado diversos modelos en los que se han ido variando, progresivamente, cada una de las características geométricas mencionadas anteriormente.

Por último, se han extraído las conclusiones más relevantes sobre el comportamiento de este tipo de puentes al variar su geometría.

El objetivo de este documento no es otro que el conocer cómo influye en el comportamiento del puente formado por dos vigas cajón (desplazamientos, distorsión, esfuerzos y tensiones) la variación de algunas de sus características geométricas.

Abstract

The present work treats on the behavior of the bridges formed by two box girders. Firstly, there has been studied the behavior of a bridge which has been taken as reference model, reproducing the study which D. Javier Manterola performs in his book ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo I’.

Later, once corroborated the results obtained in the model of reference with the obtained ones by the author in his study, we have proceeded to the analysis of several bridges, defining four cases: variation of the span of the bridge, variation of the inclination of the souls, variation of the width of the booths and variation of the separation between booths. In every case, diverse models have been studied in those who have been changed, progressively, each of the geometric characteristics mentioned previously.

Finally, the most relevant conclusions about the behaviour of this kind of bridges, when their geometry changes, have been extracted.

The aim of this document is to know how the variation of some of its geometric characteristics influences the behavior of the bridge formed by two box girders (displacements, distortion, stresses and strains).

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
1 Introducción	1
2 Base metodológica	3
2.1 <i>Consideraciones generales</i>	3
2.2 <i>Descripción del modelo de referencia y de los casos considerados</i>	4
2.2.1 Caso 1: Variación de la luz	4
2.2.2 Caso 2: Variación de la inclinación de las almas	5
2.2.3 Caso 3: Variación del ancho de los cajones	5
2.2.4 Caso 4: Variación de la separación entre cajones	6
3 Comportamiento de un tablero formado por dos vigas cajón	9
3.1 <i>Descripción del modelo</i>	9
3.2 <i>Respuesta ante carga puntual</i>	10
3.2.1 Desplazamientos	10
3.2.2 Distorsión	13
3.2.3 Esfuerzos	15
3.2.4 Tensiones	18
4 Estudio paramétrico y el comportamiento de un tablero formado por dos vigas cajón	24
4.1 <i>Caso 1: Variación de la luz</i>	23
4.1.1 Descripción del modelo	23
4.1.2 Resultados obtenidos en el caso 1	23
4.2 <i>Caso 2: Variación de la inclinación de las almas</i>	42
4.2.1 Descripción del modelo	42
4.2.2 Resultados obtenidos en el caso 2	42
4.3 <i>Caso 3: Variación del ancho de los cajones</i>	63
4.3.1 Descripción del modelo	63
4.3.2 Resultados obtenidos en el caso 3	63
4.4 <i>Caso 4: Variación de la separación entre cajones</i>	82
4.4.1 Descripción del modelo	82
4.4.2 Resultados obtenidos en el caso 4	82
5 Conclusiones y desarrollo futuro	105
5.1 <i>Conclusiones</i>	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01: Propiedades del hormigón HP-40	4
Tabla 02: Desplazamientos de los nodos 14011 y 10563 (m)	11
Tabla 03: Ángulos y distorsión a lo largo de la luz del modelo de ref. del cajón izquierdo	13
Tabla 04: Ángulos y distorsión a lo largo de la luz del modelo de ref. del cajón derecho	14

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01: Geometría de la sección transversal	4
Figura 02: Inclinaciones de las almas de los modelos estudiados	5
Figura 03: Varias secciones con distinto ancho de cajón	6
Figura 04: Varias secciones con distinta separación entre cajones	6
Figura 05: Sección transversal y posición de la carga	9
Figura 06: Desplazamientos del puente (m) del modelo de D. Javier Manterola	10
Figura 07: Desplazamientos (m) en la sección $x=20$ m	10
Figura 08: Desplazamientos (m) para la sección $x=15$ m	11
Figura 09: Distribución de la flecha a lo largo de la luz en los nudos 2, 5, 8 y 11	11
Figura 10: Desplazamientos de la sección $x=20$ m (Estudio D. Javier Manterola)	12
Figura 11: Desplazamientos de la sección $x=15$ m (Estudio D. Javier Manterola)	12
Figura 12: Desplazamientos a lo largo de la luz de los nudos 2,5,8 y 11 (Estudio D. Javier Manterola)	12
Figura 13: Ángulos para el cálculo de la distorsión	13
Figura 14: Distorsión de los dos cajones a lo largo de la luz (Estudio de D. Javier Manterola)	14
Figura 15: Distribución de los momentos M_y a lo largo de la luz (Estudio de D. Javier Manterola)	15
Figura 16: Distribución del cortante Q_y a lo largo de la luz (estudio de D. Javier Manterola)	16
Figura 17: Distribución del cortante Q_y a lo largo de la luz representada con Midas (Estudio de D. Javier Manterola)	16
Figura 18: Distribución del axil N_y a lo largo de la luz (Estudio de D. Javier Manterola)	16
Figura 19: Distribución del axil N_y a lo largo de la luz representada con Midas (Estudio de D. Javier Manterola)	17
Figura 20: Distribución del cortante N_{xy} a lo largo de la luz (Estudio de D. Javier Manterola)	17
Figura 21: Distribución del cortante N_{xy} a lo largo de la luz representada con Midas (Estudio de D. Javier Manterola)	17
Figura 22: Esfuerzos obtenidos por D. Javier Manterola en su estudio	18
Figura 23: Distribución de σ_{xx} (MPa) a lo largo de la luz (Estudio de D. Javier Manterola)	19
Figura 24: Distribución de las tensiones de σ_{xx} (MPa) en la sección central ($x=20$ m) del estudio de D. Javier Manterola	19
Figura 25: Distribución de las tensiones de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=15$ m del estudio de D. Javier Manterola	20
Figura 26: Distribución de τ_{xy} (MPa) a lo largo de la luz (estudio de D. Javier Manterola)	20
Figura 27: Distribución de las tensiones de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=19.5$ m del estudio de D. Javier Manterola	20
Figura 28: Distribución de las tensiones τ_{xy} (MPa) en la sección $x=10$ m del estudio de D. Javier Manterola	21
Figura 29: Distribución de las tensiones σ_{xx} (MPa) a lo largo de la luz en los nudos 2, 3, 5 y 6, obtenida por D. Javier Manterola	21

Figura 30: Distribución de σ_{xx} (MPa) en el centro de la luz ($x=20m$), obtenida por D. Javier Manterola	21
Figura 31: Distribución de σ_{xx} (MPa) para $x=15m$, obtenida por D. Javier Manterola	22
Figura 32: Distribución de τ_{xy} (MPa) a lo largo de la luz en los nudos 2, 3, 5 y 6, obtenida por D. Javier Manterola	22
Figura 33: Distribución de τ_{xy} (MPa) para $x=19.5m$, obtenida por D. Javier Manterola	22
Figura 34: Distribución de τ_{xy} (MPa) para $x=10m$, obtenida por D. Javier Manterola	22
Figura 35: Desplazamientos (m) del modelo de 45 metros de luz	25
Figura 36: Desplazamientos (m) del modelo de 60 metros de luz	26
Figura 37: Desplazamientos (m) del modelo de 80 metros de luz	26
Figura 38: Desplazamientos verticales del cajón izquierdo al variar la luz del puente	27
Figura 39: Desplazamientos verticales del cajón derecho al variar la luz del puente	27
Figura 40: Relación flecha máxima-luz del puente	28
Figura 41: Relación luz-distorsión de la sección central	28
Figura 42: Distribución del momento M_y para los modelos de 40, 45, 50, 60 y 80 metros de luz	29
Figura 43: Distribución del cortante Q_y para los modelos de 40, 45, 50, 60 y 80 metros de luz	30
Figura 44: Relación cortante Q_y máximo-luz del puente	30
Figura 45: Distribución del axil N_y para los modelos de 40, 45, 50, 60 y 80 metros de luz	31
Figura 46: Relación axil N_y máximo-luz del puente	31
Figura 47: Distribución del cortante N_{xy} para los modelos de 40, 45, 50, 60 y 80 metros de luz	32
Figura 48: Relación cortante N_{xy} máximo-luz del puente	33
Figura 49: Distribución de las tensiones normales en el nudo 2 a lo largo de la luz (modelos del caso 1)	33
Figura 50: Distribución de las tensiones normales en el nudo 3 a lo largo de la luz (modelos del caso 1)	34
Figura 51: Distribución de las tensiones normales en el nudo 5 a lo largo de la luz (modelos del caso 1)	35
Figura 52: Distribución de las tensiones normales en el nudo 6 a lo largo de la luz (modelos del caso 1)	35
Figura 53: Relación σ_{xx} máximas en los nudos-luz del puente	36
Figura 54: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=22.5 m$, del modelo de 45 metros de luz	36
Figura 55: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=17 m$, del modelo de 45 metros de luz	37
Figura 56: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=40 m$, del modelo de 80 metros de luz	37
Figura 57: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=30 m$, del modelo de 80 metros de luz	37
Figura 58: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 2, a lo largo de la luz, para los modelos de 40, 45, 50, 60 y 80 metros de luz	39
Figura 59: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 3, a lo largo de la luz, para los modelos de 40, 45, 50, 60 y 80 metros de luz	41
Figura 60: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 5, a lo largo de la luz, para los modelos de 40, 45, 50, 60 y 80 metros de luz	42
Figura 61: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 6, a lo largo de la luz, para los modelos de 40, 45, 50, 60 y 80 metros de luz	42
Figura 62: Relación τ_{xy} máxima en los nudos-luz	43
Figura 63: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=0 m$, del modelo de 45 metros de luz	43
Figura 64: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=11.25 m$, del modelo de 45 metros de luz	44
Figura 65: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=0 m$, del modelo de 80 metros de luz	44

Figura 66: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=20$ m, del modelo de 80 metros de luz	44
Figura 67: Desplazamientos (m) del modelo con las almas inclinadas 40°	45
Figura 68: Desplazamientos (m) del modelo con las almas inclinadas 50°	45
Figura 69: Desplazamientos (m) del modelo con las almas inclinadas 70°	45
Figura 70: Desplazamientos (m) del modelo con las almas inclinadas 80°	46
Figura 71: Desplazamientos verticales del cajón izquierdo al variar la inclinación de las almas	46
Figura 72: Desplazamientos verticales del cajón derecho al variar la inclinación de las almas	47
Figura 73: Relación flecha máxima-inclinación de las almas	47
Figura 74: Relación inclinación de las almas-distorsión de la sección central	48
Figura 75: Distribución del momento M_y para los modelos con 40° , 45° , 50° , 60° , 70° , 80° y 90° de inclinación de las almas	49
Figura 76: Distribución del cortante Q_y para los modelos con 40° , 45° , 50° , 60° , 70° , 80° y 90° de inclinación de las almas	49
Figura 77: Relación cortante Q_y máximo-inclinación de las almas	50
Figura 78: Distribución del axil N_y para los modelos con 40° , 45° , 50° , 60° , 70° , 80° y 90° de inclinación de las almas	50
Figura 79: Relación axil N_y máximo-inclinación de las almas	51
Figura 80: Distribución del cortante N_{xy} los modelos con 40° , 45° , 50° , 60° , 70° , 80° y 90° de inclinación de las almas	51
Figura 81: Relación cortante N_{xy} máximo-inclinación de las almas	52
Figura 82: Distribución de las tensiones σ_{xx} (MPa) en el nudo 2 a lo largo de la luz de todos los modelos del caso 2	53
Figura 83: Distribución de las tensiones σ_{xx} (MPa) en el nudo 3 a lo largo de la luz de todos los modelos del caso 2	55
Figura 84: Distribución de las tensiones σ_{xx} (MPa) en el nudo 5 a lo largo de la luz de todos los modelos del caso 2	56
Figura 85: Distribución de las tensiones σ_{xx} (MPa) en el nudo 5 a lo largo de la luz de todos los modelos del caso 2 (ampliado)	56
Figura 86: Distribución de las tensiones σ_{xx} (MPa) en el nudo 6 a lo largo de la luz de todos los modelos del caso 2	57
Figura 87: Relación σ_{xx} máximas en los nudos-inclinación de las almas	57
Figura 88: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=20$ m, del modelo con las almas inclinadas 40°	58
Figura 89: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=15$ m, del modelo con las almas inclinadas 40°	58
Figura 90: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=20$ m, del modelo con las almas inclinadas 70°	59
Figura 91: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=15$ m, del modelo con las almas inclinadas 70°	59
Figura 92: Distribución de las tensiones σ_{xx} (MPa) en el nudo 1 a lo largo de la luz de todos los modelos del caso 2	60
Figura 93: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 2, a lo largo de la luz, para los modelos del caso 2	61
Figura 93.1: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 2 a lo largo de la luz, para los modelos del caso 2	61
Figura 94: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 3, a lo largo de la luz, para los modelos del caso 2	62
Figura 95: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 5, a lo largo de la luz, para los modelos del caso 2	62
Figura 96: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 6, a lo largo de la luz, para los modelos del caso 2	63

Figura 97: Relación τ_{xy} máxima en los nudos-inclinación de las almas	64
Figura 98: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=19.5$ m, del modelo con las almas inclinadas 40°	64
Figura 99: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=10$ m, del modelo con las almas inclinadas 40°	64
Figura 100: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=19.5$ m, del modelo con las almas inclinadas 70°	65
Figura 101: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=10$ m, del modelo con las almas inclinadas 70°	65
Figura 102: Desplazamientos (m) del modelo con un ancho de cajones de 2 metros	66
Figura 103: Desplazamientos (m) del modelo con un ancho de cajones de 3 metros	66
Figura 104: Desplazamientos (m) del modelo con un ancho de cajones de 4 metros	66
Figura 105: Desplazamientos (m) del modelo con un ancho de cajones de 7 metros	67
Figura 106: Desplazamientos (m) del modelo con un ancho de cajones de 8 metros	67
Figura 107: Desplazamientos verticales del cajón izquierdo al variar el ancho de los cajones	68
Figura 108: Desplazamientos verticales del cajón derecho al variar el ancho de los cajones	68
Figura 109: Relación flecha máxima-ancho de los cajones	69
Figura 110: Relación ancho de los cajones-distorsión de la sección central	69
Figura 111: Distribución del momento M_y para los modelos de 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros de ancho de cajones	70
Figura 112: Distribución del momento Q_y para los modelos de 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros de ancho de cajones	71
Figura 113: Relación cortante Q_y máximo-ancho de los cajones	71
Figura 114: Distribución del momento N_y para los modelos de 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros de ancho de cajones	72
Figura 115: Relación axil N_y máximo-ancho de los cajones	72
Figura 116: Distribución del momento N_{xy} para los modelos de 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros de ancho de cajones	73
Figura 117: Relación cortante N_{xy} máximo-ancho de los cajones	73
Figura 118: Distribución de σ_{xx} (MPa) en el nudo 2 a lo largo de la luz de los modelos de ancho 2, 3.5, 4.5, 7 y 8 metros	75
Figura 119: Distribución de σ_{xx} (MPa) en el nudo 3 a lo largo de la luz de los modelos de ancho 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros	76
Figura 120: Distribución de σ_{xx} (MPa) en el nudo 5 a lo largo de la luz de los modelos de ancho 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros	76
Figura 121: Distribución de σ_{xx} (MPa) en el nudo 6 a lo largo de la luz de los modelos de ancho 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros	77
Figura 122: Relación σ_{xx} máximas en los nudos-ancho de los cajones	77
Figura 123: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=20$ m, del modelo con 2 metros de ancho de cajón	78
Figura 124: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=15$ m, del modelo con 2 metros de ancho de cajón	78
Figura 125: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=20$ m, del modelo con 8 metros de ancho de cajón	78
Figura 126: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=15$ m, del modelo con 8 metros de ancho de cajón	79

Figura 127: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 2, a lo largo de la luz, para los modelos de ancho 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros	81
Figura 128: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 3, a lo largo de la luz, para los modelos de ancho 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros	81
Figura 129: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 5, a lo largo de la luz, para los modelos de ancho 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros	82
Figura 130: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 6, a lo largo de la luz, para los modelos de ancho 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros	82
Figura 131: Relación τ_{xy} máxima en los nudos-ancho de los cajones	83
Figura 132: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=19.5$ m, del modelo con un ancho de cajón igual a 2 metros	83
Figura 133: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=10$ m, del modelo con un ancho de cajón igual a 2 metros	83
Figura 134: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=19.5$ m, del modelo con un ancho de cajón igual a 8 metros	84
Figura 135: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=10$ m, del modelo con un ancho de cajón igual a 8 metros	84
Figura 136: Desplazamientos (m) del modelo de 2 metros de separación entre cajones	85
Figura 137: Desplazamientos (m) del modelo de 2.5 metros de separación entre cajones	85
Figura 138: Desplazamientos (m) del modelo de 4 metros de separación entre cajones	85
Figura 139: Desplazamientos (m) del modelo de 5 metros de separación entre cajones	86
Figura 140: Desplazamientos (m) del modelo de 6.5 metros de separación entre cajones	86
Figura 141: Desplazamientos (m) del modelo de 8 metros de separación entre cajones	86
Figura 142: Variación de la flecha con la separación entre cajones (cajón izquierdo)	87
Figura 143: Variación de la flecha con la separación entre cajones (cajón derecho)	87
Figura 144: Relación flecha máxima-separación entre cajones	88
Figura 145: Relación separación entre cajones-distorsión de la sección central	88
Figura 146: Distribución del momento M_y para los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones	89
Figura 147: Distribución del momento Q_y para los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones	90
Figura 148: Relación cortante Q_y máximo-separación entre cajones	90
Figura 149: Distribución del momento N_y para los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones	91
Figura 150: Relación axil N_y máximo-separación entre cajones	91
Figura 151: Distribución del momento N_{xy} para los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones	92
Figura 152: Relación cortante N_{xy} máximo-separación entre cajones	92
Figura 153: Distribución de σ_{xx} (MPa) en el nudo 2 a lo largo de la luz de los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones	94
Figura 154: Distribución de σ_{xx} (MPa) en el nudo 3 a lo largo de la luz de los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones	95
Figura 155: Distribución de σ_{xx} (MPa) en el nudo 5 a lo largo de la luz de los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones	95

Figura 155.1: Distribución de σ_{xx} (MPa) en el nudo 5 a lo largo de la luz de los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones	96
Figura 156: Distribución de σ_{xx} (MPa) en el nudo 6 a lo largo de la luz de los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones	96
Figura 157: Relación σ_{xx} máximas en los nudos-separación entre cajones	97
Figura 158: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=20$ m, del modelo de 2 metros de separación entre cajones	97
Figura 159: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=15$ m, del modelo de 2 metros de separación entre cajones	98
Figura 160: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=20$ m, del modelo de 8 metros de separación entre cajones	98
Figura 161: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=15$ m, del modelo de 8 metros de separación entre cajones	98
Figura 162: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 2 a lo largo de la luz de los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones	100
Figura 163: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 3 a lo largo de la luz de los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones	102
Figura 164: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 5 a lo largo de la luz de los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones	103
Figura 165: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 6 a lo largo de la luz de los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones	103
Figura 166: Relación τ_{xy} máxima en los nudos-separación entre cajones	104
Figura 167: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=0$ m, del modelo de 2 metros de separación entre cajones	104
Figura 168: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=10$ m, del modelo de 2 metros de separación entre cajones	104
Figura 169: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=0$ m, del modelo de 8 metros de separación entre cajones	105
Figura 170: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=10$ m, del modelo de 8 metros de separación entre cajones	105

1 INTRODUCCIÓN

La Ciencia puede divertirnos y fascinarnos, pero es la Ingeniería la que cambia el mundo.

- Isaac Asimov -

Un puente es una construcción que permite salvar una accidente geográfico como un río, un cañón, una carretera, un camino, una vía férrea o cualquier otro obstáculo físico. El diseño de cada puente varía dependiendo de su función y de la naturaleza del terreno sobre el que se construye.

La necesidad humana de cruzar pequeños arroyos y ríos fue el comienzo de la historia de los puentes. Hasta el día de hoy, la técnica ha pasado desde una simple losa hasta grandes puentes colgantes que miden varios kilómetros y que cruzan bahías. Los puentes romanos hechos con bloques de piedra, o una pasarela de los Incas del Perú no son sólo una respuesta a un determinado problema de cruzar de un lado a otro, sino que también es una definición de lo que es un puente. Nos transmiten no sólo el cómo se han realizado y para qué sirven, sino que empiezan a descubrirnos el qué de los puentes, su esencia.

Los puentes se han convertido a lo largo de la historia no solo en un elemento muy básico para una sociedad, sino en símbolo de su capacidad tecnológica.

Según su morfología estructural, podemos diferenciar las siguientes tipologías de puentes: puentes arco, puentes en viga, puentes pórticos, puentes colgantes y puentes atirantados, además de los puentes flotantes, móviles y trasbordadores, cuya característica común y más peculiar es la movilidad.

En este trabajo nos centraremos en los puentes en viga. Más concretamente, en los puentes con sección en cajón de hormigón, los cuales, desde el punto de vista resistente, tienen las siguientes ventajas:

- Tienen una gran cabeza superior e inferior, lo que los hace aptos para soportar grandes momentos flectores, tanto positivos como negativos.
- Al ser una sección cerrada, proporciona una gran rigidez a la torsión, alabeos pequeños y distorsión reducida.
- Por la propiedad anterior, la sección cajón es apta para soportar grandes cargas descentradas sin que se produzcan una gran disimetría en la distribución de las tensiones longitudinales de flexión en la sección transversal.
- Su gran rigidez transversal le permite reducir al mínimo el espesor de sus paredes, lo que supone un ahorro en los materiales.
- Tiene un gran radio de giro, por lo que se obtiene un excelente rendimiento para el pretensado.

Estas propiedades permiten obtener el máximo rendimiento a la distribución del material, obteniéndose tableros muy ligeros y resistentes, lo que la convierte en la sección ideal para los puentes de gran luz.

Este tipo de sección podría utilizarse para todo tipo de luces, pequeñas y grandes, pero en las primeras las dificultades de ejecución no compensan las ventajas en peso y rendimiento que este tipo de sección presenta.

La sección cajón, en sus múltiples modalidades, constituye la morfología básica de los tableros de los puentes rectos, atirantados y colgantes de gran luz. Los puentes arcos, por su tradición y especial funcionamiento

resistente, no adoptan siempre este tipo de sección transversal.

Aunque, como se ha visto, son muchas las ventajas de este tipo de secciones, si se aumenta mucho la anchura del puente, la sección transversal del cajón monocelular, sobre todo si tiene una relación ancho-luz grande, pierde eficacia resistente y eleva mucho el coste de los equipos de construcción. Por ello, se contemplan varias alternativas, entre las cuales se encuentra la opción de adosar varias vigas cajón. Este modelo de sección será el objeto de estudio del presente trabajo, concretamente, el tablero formado por dos vigas cajón.

¿Por qué adosar varias vigas cajón?

Se pueden hacer dos versiones: dejando los cajones separados o unidos por la losa superior.

Desde el punto de vista de su respuesta a flexión vertical, ambas soluciones son muy parecidas. Sin embargo, cuando se carga uno solo de los cajones, la continuidad transversal, en el caso de tableros solidarios, introduce torsiones que no tendría si los cajones estuviesen separados, lo que hace que salvo en los casos de tableros muy anchos en los cuales el tráfico pasa por la unión entre ellos, en los demás se deban separar claramente.

Desde el punto de vista constructivos este modelo tiene la ventaja de poder utilizar equipos de montaje o ejecución menos pesados y por lo tanto más baratos, lo que la ha convertido en la solución ideal para puentes de autopista.

En este trabajo, además de corroborar el estudio realizado por D. Javier Manterola^[1], se estudiará la respuesta resistente de otros cuatro modelos, en cada uno de los cuales se variarán uno de los parámetros geométricos del puente (luz, inclinación de las almas, ancho de los cajones y separación de los mismos), manteniendo constantes (e iguales al modelo de referencia, el del libro de D. Javier Manterola^[1]) el resto.

De esta forma, se podrá conocer la influencia de dichos parámetros geométricos en el comportamiento de un puente formado por dos vigas cajón, pudiendo obtener conclusiones acerca del comportamiento del puente en cada caso.

2 BASE METODOLÓGICA

El estudio paramétrico realizado en el presente trabajo ha sido concebido a partir del estudio realizado en el capítulo V “La sección cajón de hormigón” del libro ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo I’ de D. Javier Manterola Armisen^[1].

La motivación del análisis ha sido justificada para poder corroborar los resultados y conclusiones de Javier Manterola en el libro anteriormente mencionado, así como, profundizar en la influencia que tienen algunas de las características geométricas de los puentes formados por dos vigas cajón en el comportamiento de los mismos.

Para la realización del estudio se ha empleado el programa Midas Civil 2017^[3]. En él, se han realizado los diferentes tipos de modelos, estableciendo analogías entre ellos para poder compararlos, y teniendo siempre como referencia el modelo propuesto por D. Javier Manterola en su libro.

Además, se ha utilizado el programa Excel^[4] para la representación de las tensiones introducidas por la carga. La justificación de la realización de las gráficas de las tensiones de este modo es la siguiente: para poder comparar las tensiones obtenidas en los distintos modelos con las que se encuentran en el estudio de D. Javier Manterola, éstas debían ser calculadas en el centro de los elementos, opción de la que el programa Midas carece. Por ello, se obtuvieron los esfuerzos y, dividiendo éstos por el espesor del elemento, se calcularon las tensiones. Esto se ha hecho tanto para las tensiones que se representan en las secciones de los distintos modelos, como para las tensiones a lo largo de la luz del puente.

Asimismo, para la representación de las tensiones normales (y tangenciales) en la sección, se ha seguido el procedimiento anteriormente descrito, con la opción de “*cutting line*”, obteniéndose los esfuerzos en cada elemento de la sección por separado, debido a que la opción de “*cutting plane*” no permite obtener resultados numéricos, sino sólo una imagen. Con esta metodología, a la hora de representar las tensiones normales, se han obtenido para las secciones centrales, en las esquinas del cajón izquierdo, diferentes valores de las tensiones. Esto se debe a la precisión del método de los elementos finitos, el cual en zonas cercanas a una carga puntual pierde exactitud. Y más si se calculan esfuerzos, los cuales los obtiene mediante la derivación de funciones de formas y aplicando las leyes de comportamiento. La solución adoptada ha sido obtener el valor medio de los esfuerzos de los elementos en torno al punto donde se produzca dicho error.

Por último, señalar que los croquis que aparecen a lo largo del presente trabajo han sido realizados con el programa AutoCAD^[5].

2.1 Consideraciones generales

Con el fin de lograr un análisis pormenorizado de todos los casos, se han establecido, en todos los modelos, elementos tipo placa gruesa (considerando la deformación por cortante) de 0.25 metros en la dirección X, 0.25 metros en la dirección Y, y un espesor igual a 0.2 metros.

Las direcciones de los ejes de coordenadas serán las siguientes:

- Eje X: determina la dirección del puente, la luz.
- Eje Y: la anchura del puente, comenzando por la esquina derecha de la losa superior.
- Eje Z: perpendicular a los dos anteriores, teniendo el origen en la losa superior.

Por otro lado, las condiciones de contorno que se han impuesto representan a dos diafragmas colocados en los extremos del puente. Teniendo en cuenta que en cada extremo se tiene 4 apoyos, y aplicando la herramienta “*rigid link*” del programa Midas Civil, basta con imponer las condiciones de contorno en un apoyo de cada extremo para reproducir la colocación de diafragmas.

Por lo tanto, en uno de los extremos se restringieron los desplazamientos en las tres direcciones (u_x , u_y y u_z), así como el giro alrededor del eje X (θ_x), y sólo hizo falta hacerlo en uno de los apoyos. En el otro extremo del puente, en el apoyo contrario al anterior, se restringieron los desplazamientos en los ejes Y y Z (u_y y u_z) y el giro alrededor del eje X (θ_x).

También cabe señalar que la carga puntual, de 100 toneladas (980.67 kN), se ha aplicado sobre el alma izquierda del cajón izquierdo en todos los modelos de los distintos casos.

En cuanto a la nomenclatura de los nudos, se ha mantenido la misma que utiliza D. Javier Manterola en su libro, para mayor comodidad a la hora de comparar resultados. En la figura 01, se han señalado y nombrado los nudos que serán útiles para el estudio.

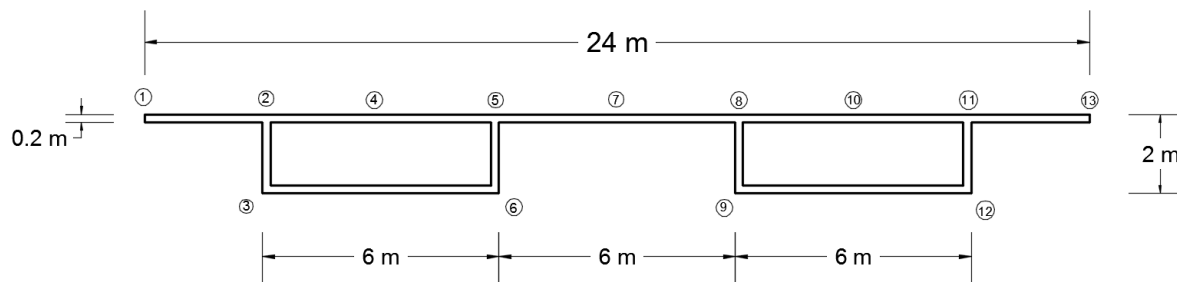


Figura 01: Geometría de la sección transversal

Por último, el material empleado ha sido un hormigón HP-40, cuyas propiedades son las siguientes:

Características del hormigón HP-40	
Resistencia característica (f_{ck})	40 MPa
Módulo de elasticidad (E_c)	35220 MPa
Peso específico (γ_c)	25 kN/m ³
Coefficiente de Poisson (ν)	0.2

Tabla 01: Propiedades del hormigón HP-40

2.2 Descripción del modelo de referencia y de los casos considerados

Como se ha mencionado anteriormente, el modelo del cual parte este estudio es el propuesto por D. Javier Manterola. Se trata de un puente de 40 metros de luz, 12 metros de anchura (losa superior) y 2 metros de canto. Se encuentra biapoyado en sus extremos, en los cuales se han colocado además diafragmas.

A continuación, se describirán las características geométricas de cada uno de los casos que se han tenido en cuenta. En cada uno de ellos, se ha ido variando un parámetro geométrico para analizar cómo ha ido cambiando el comportamiento del puente.

2.2.1 Caso 1: Variación de la luz

En este caso, se ha ido variando la luz desde los 40 metros iniciales del modelo de D. Javier Manterola hasta los 80 metros, incrementándose cada 5 metros y analizando la respuesta del puente. La sección transversal se ha mantenido constante e igual al modelo de referencia.

2.2.2 Caso 2: Variación de la inclinación de las almas

Desde la posición inicial de 90° , hemos ido disminuyendo la inclinación de 10° en 10° hasta llegar al máximo posible que nos permitía mantener la anchura del cajón igual que en el modelo de referencia, es decir, hasta los 40° .

En la siguiente figura se pueden ver las distintas inclinaciones de las almas que hemos tomado para las dos vigas cajón (solo se ha representado una). Y en todos los modelos, la luz sería de 40 metros y el ancho del cajón igual a 24 metros.

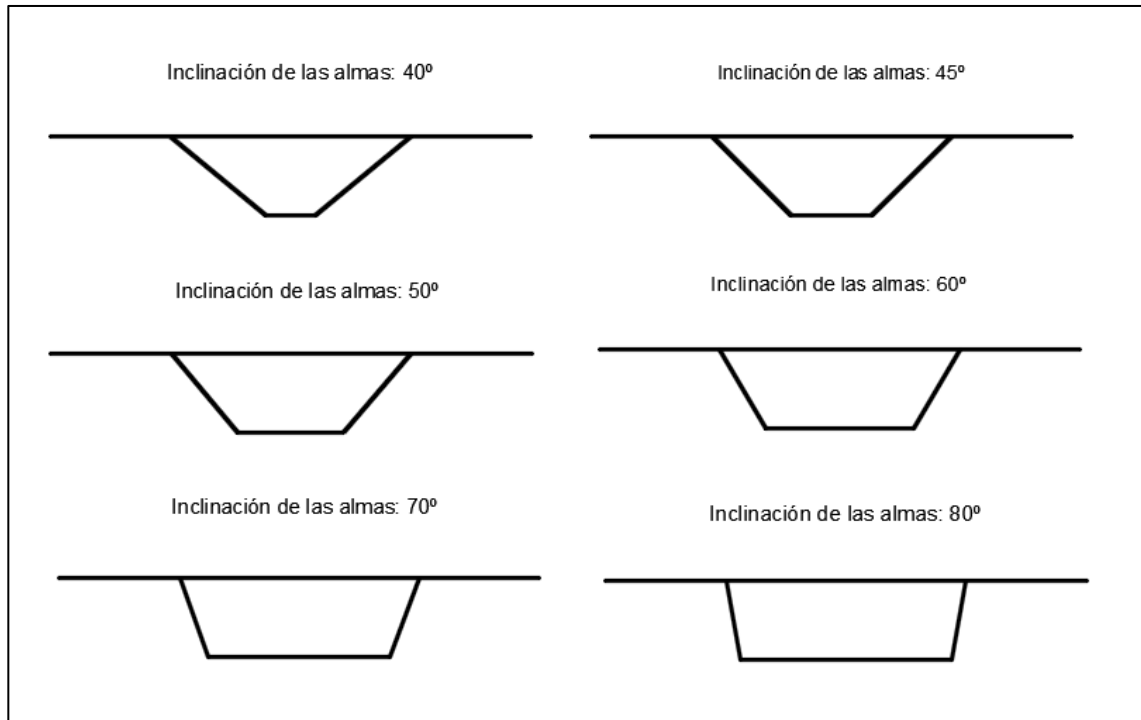


Figura 02: Inclinaciones de las almas de los modelos estudiados

2.2.3 Caso 3: Variación del ancho de los cajones

La variación se ha hecho cada 0.5 metros, comenzando con un ancho igual a 2 metros hasta llegar a los 8 metros de anchura. En este caso, como es obvio, la longitud de la losa superior variará desde los 16 metros hasta los 28 metros, aunque la luz sí será constante (40 metros).

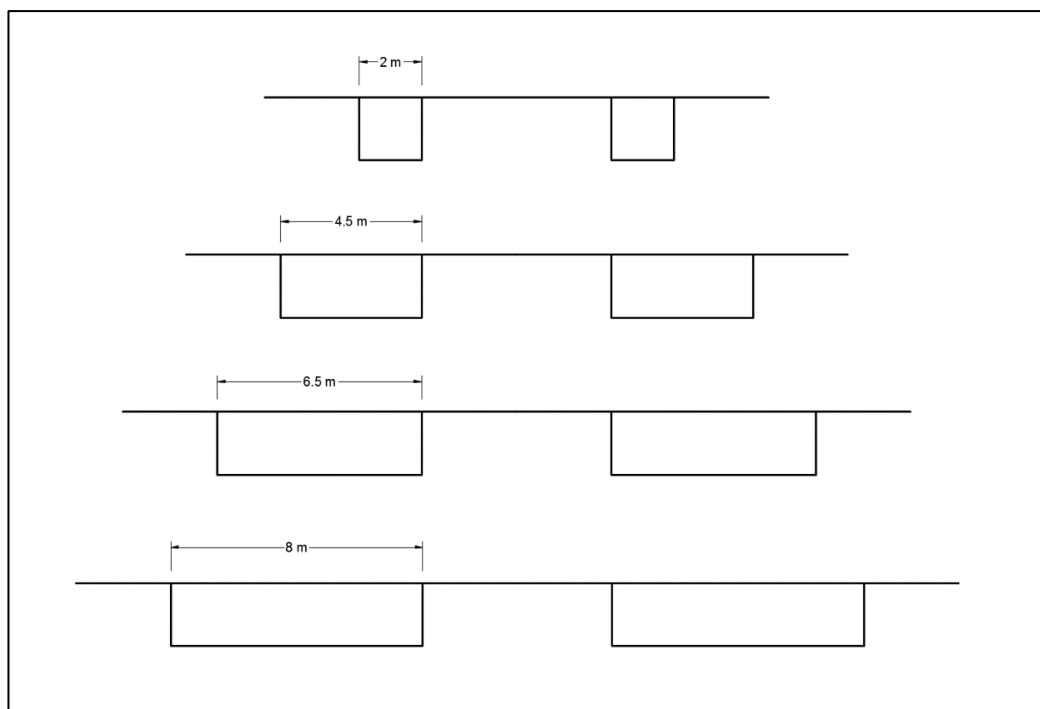


Figura 03: Varias secciones con distinto ancho de cajón

2.2.4 Caso 4: Variación de la separación entre cajones

La variación se ha hecho cada 0.5 metros, comenzando con un ancho igual a 2 metros hasta llegar a los 8 metros de anchura. En este caso, como es obvio, la longitud de la losa superior variará desde los 16 metros hasta los 28 metros, aunque la luz sí será constante (40 metros).

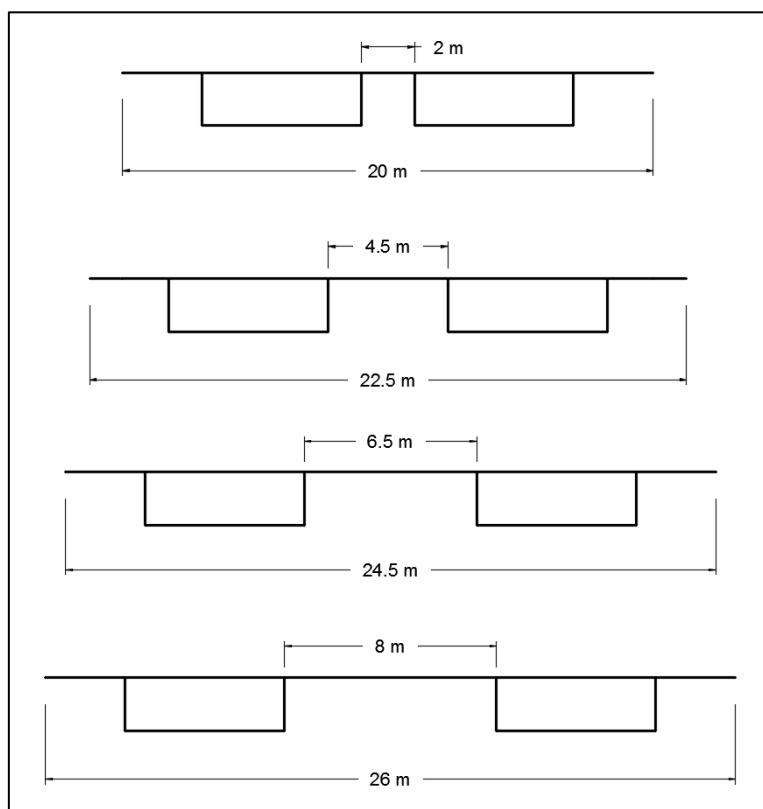


Figura 04: Varias secciones con distinta separación entre cajones

En la figura anterior sólo se han mostrado algunos de los modelos para el caso 4 (variación de la separación de cajones), ya que estos ejemplos son suficientes para explicar cómo ha variado la geometría de la sección.

Una vez explicada la metodología seguida, el modelo de elementos finitos que se ha elaborado y las características geométricas de los modelos, procederemos al estudio detallado de los casos anteriormente definidos, pudiendo obtener conclusiones acerca de la influencia que tienen cada uno de los parámetros geométricos. Previamente, haremos el mismo estudio que realizó D. Javier Manterola en su libro, para así poder corroborar sus resultados, además de reafirmar que el modelo de elementos finitos escogido es el adecuado.

3 COMPORTAMIENTO DE UN TABLERO FORMADO POR DOS VIGAS CAJÓN

En el presente capítulo se procede a estudiar detalladamente el comportamiento de un tablero formado por dos vigas cajón, sometido a una carga puntual de 100 toneladas colocada en la losa superior sobre el alma izquierda del cajón izquierdo del tablero. Este estudio es el que realiza D. Javier Manterola en el capítulo V de su libro ‘Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Tomo I’^[1].

El objetivo de este capítulo no es otro que llegar a la solución que da el autor al comportamiento de este tipo de puentes, pudiendo corroborar así sus conclusiones.

Se estudiarán esfuerzos, tensiones y desplazamientos, así como también analizaremos la distorsión y la influencia que tiene un cajón sobre el otro.

3.1 Descripción del modelo

El modelo para el estudio del tablero formado por dos vigas cajón propuesto por D. Javier Manterola es el siguiente: tablero biapoyado, formado por dos vigas cajón exactamente iguales (como se muestra en la figura 05), con una luz libre de 40 m. La carga, de 100 T, se dispone sobre el alma izquierda del cajón izquierdo, tal y como se muestra en la figura 05.

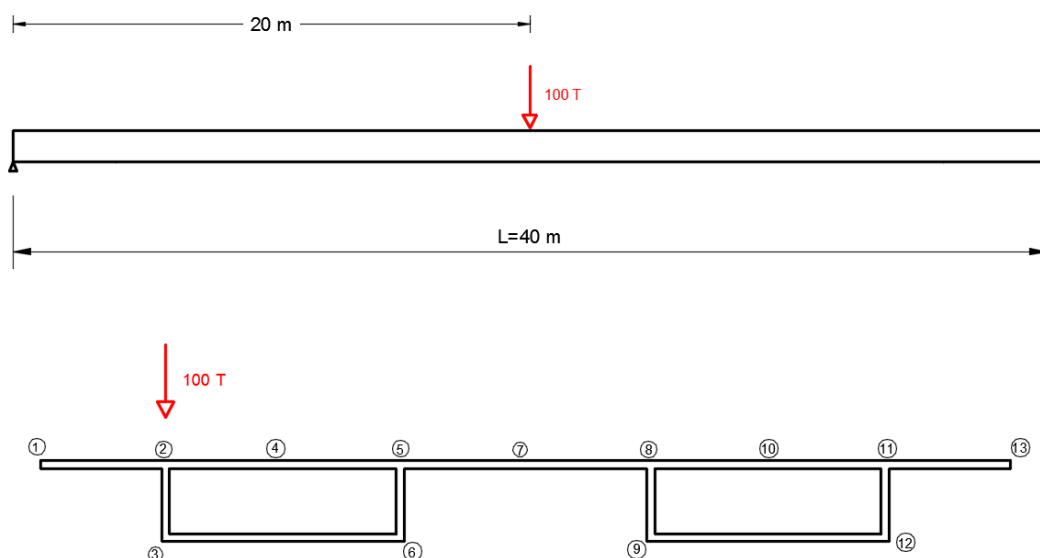


Figura 05: Sección transversal y posición de la carga

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF), que se implementa en MIDAS^[3], y se compararán con los que se presentan en el libro de D. Javier Manterola^[1].

3.2 Respuesta ante carga puntual

3.2.1 Desplazamientos

Como se puede ver en la figura 06, los mayores desplazamientos se concentran en las proximidades de la carga, atenuándose a medida que nos alejamos de ésta.

En las figuras 07 y 08 se detallan, tanto para la sección central (y sección donde se aplica la carga) y para una sección a 5 metros de distancia de ésta última, los desplazamientos que se producen. Como se ha mencionado en el párrafo anterior, se puede apreciar que, a medida que nos alejamos de la sección donde se aplica la carga, los desplazamientos van disminuyendo.

Además, como se señala en la figura 07, el máximo desplazamiento se obtiene en el nodo 14011, punto de aplicación de la carga.

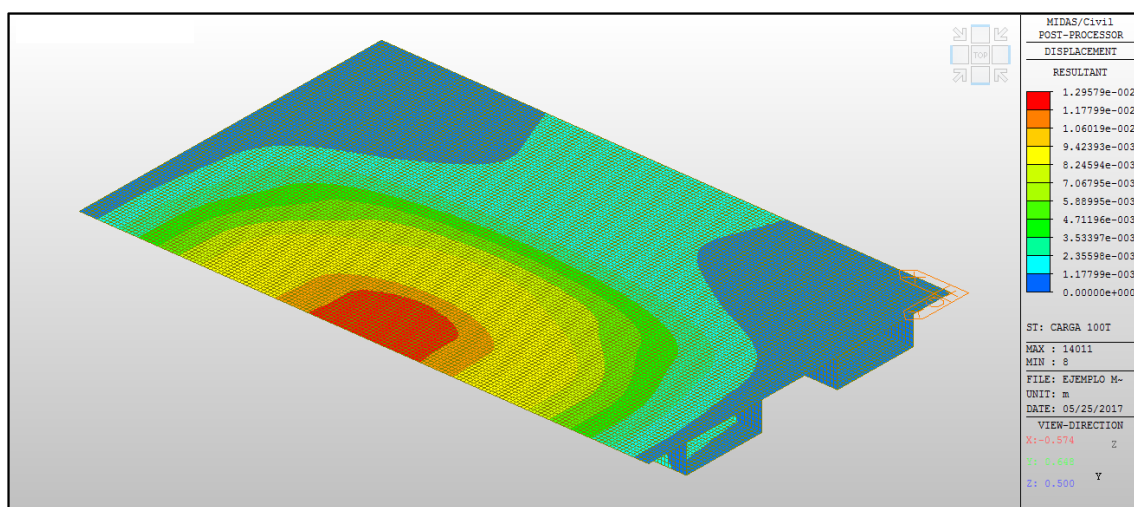


Figura 06: Desplazamientos del puente (m) del modelo de D. Javier Manterola

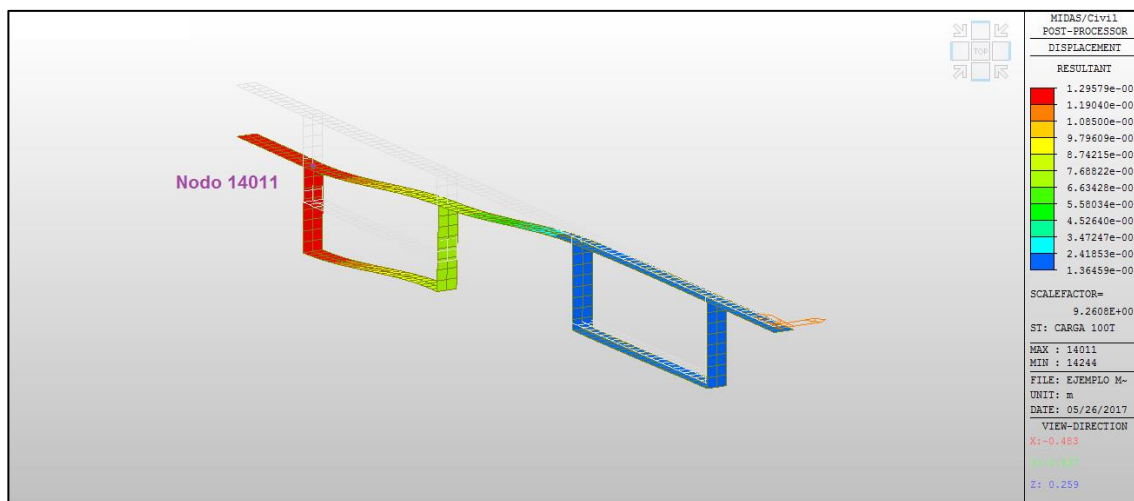


Figura 07: Desplazamientos (m) en la sección $x=20$ m

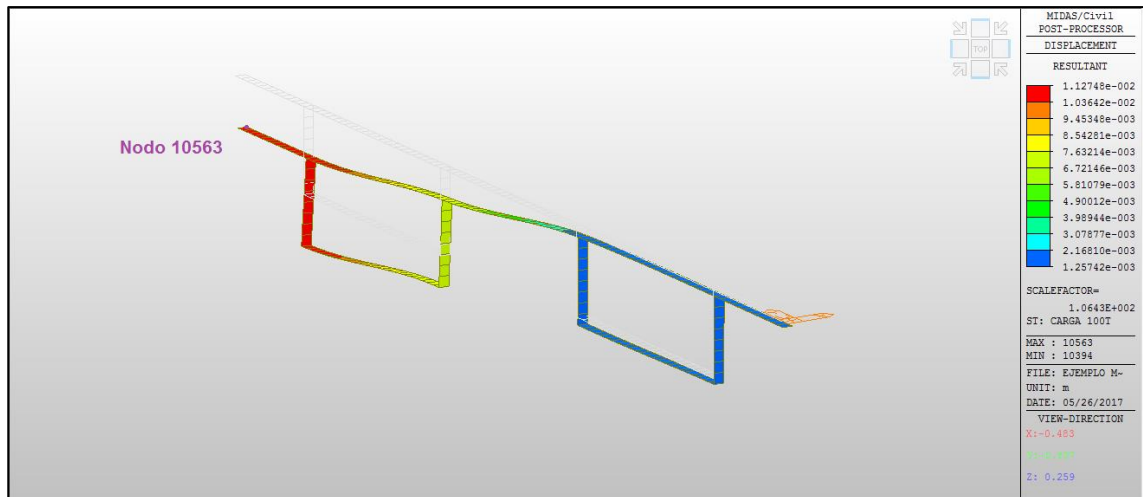


Figura 08: Desplazamientos (m) para la sección x=15 m

Los desplazamientos de los nodos señalados en las figuras 07 y 08 se recogen en la siguiente tabla:

	Dx (m)	Dy (m)	Dz (m)
Nodo 14011	0.000163	-0.000169	-0.012956
Nodo 10563	0.000435	-0.000130	-0.011266

Tabla 02: Desplazamientos de los nodos 14011 y 10563 (m)

En la siguiente imagen (Figura 09), se representa el desplazamiento en la dirección del eje Z de los nodos 2,5,8 y 11, todos pertenecientes a la losa superior, a lo largo de la luz del puente (hasta los 20 metros, el resto es simétrico).

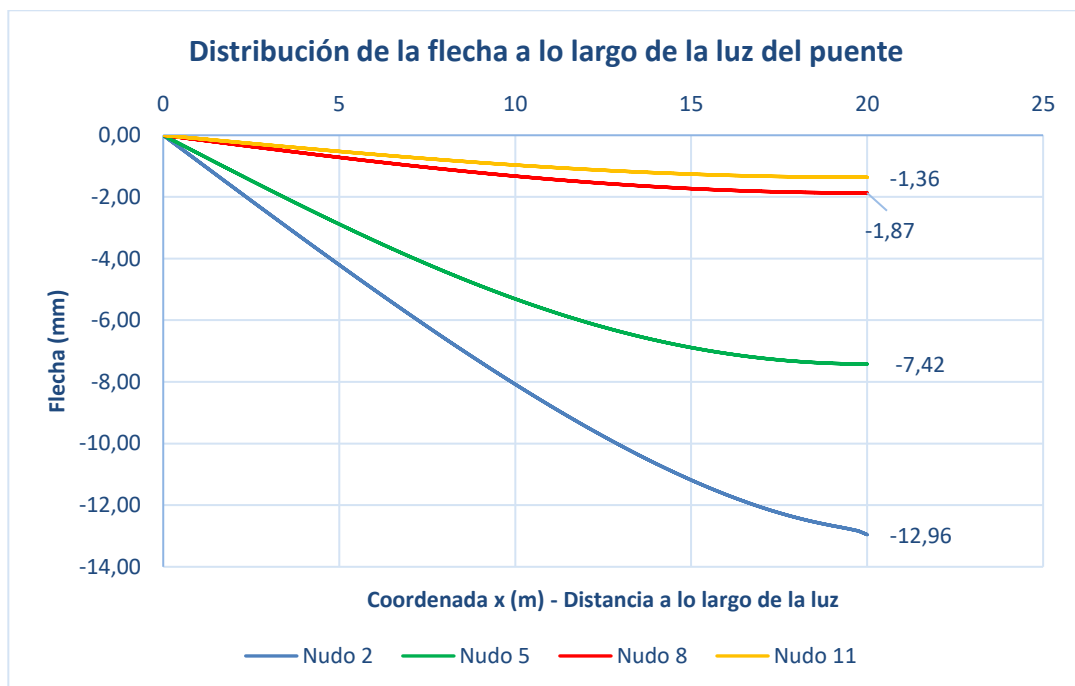


Figura 09: Distribución de la flecha a lo largo de la luz en los nudos 2, 5, 8 y 11

Como se puede observar en la gráfica, y anteriormente se ha comentado, a medida que nos alejamos del punto de aplicación de la carga, los desplazamientos verticales, van disminuyendo.

En el nudo 2, en la sección central ($x=20$ m), se da la flecha máxima causada por la aplicación de la carga de 100 T. Por otro lado, en el nudo 11 (simétrico al anterior), se puede ver que la disminución de la flecha resulta ser hasta de un orden menor.

Si se compara con los resultados obtenidos por D. Javier Manterola en su estudio, se puede apreciar las similitudes de las gráficas. A continuación, se muestran estos resultados en las figuras 10, 11 y 12: los desplazamientos en la sección $x=20$ m, en la sección $x=15$ m y la distribución de los mismos a lo largo de la luz para los nudos 2, 5, 8 y 11, respectivamente.

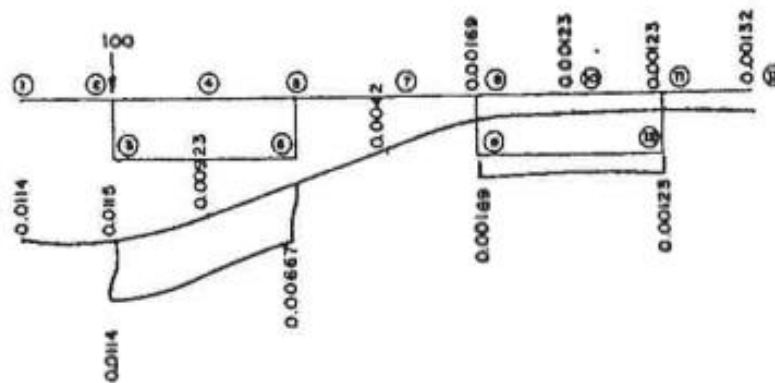


Figura 10: Desplazamientos de la sección $x=20$ m (Estudio D. Javier Manterola)

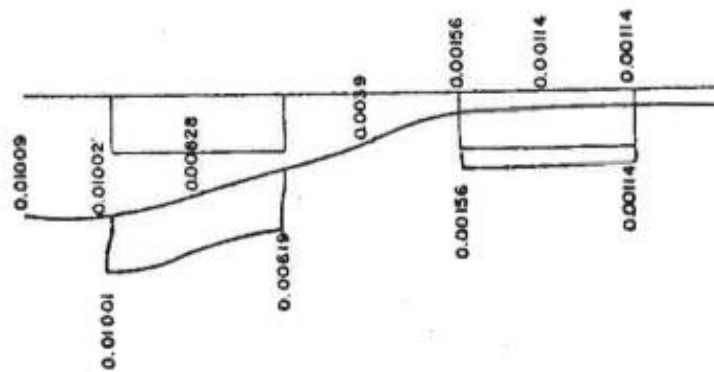


Figura 11: Desplazamientos de la sección $x=15$ m (Estudio D. Javier Manterola)

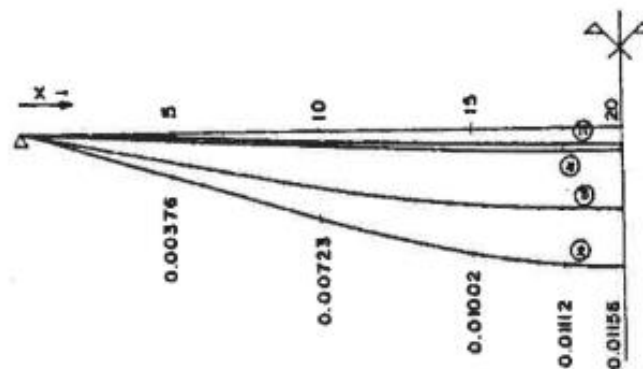


Figura 12: Desplazamientos a lo largo de la luz de los nudos 2, 5, 8 y 11 (Estudio D. Javier Manterola)

3.2.2 Distorsión

La distorsión es la deformación que presenta la sección ante la carga aplicada. En este caso, para obtener la distorsión de los dos cajones, se han calculado los ángulos que forman los cajones deformados respecto de su indeformada. Así, aplicando la fórmula de la figura 13, se tiene la distorsión (en radianes):

$$Distorsión = \frac{(\alpha + \beta) + (\gamma + \delta)}{2}$$

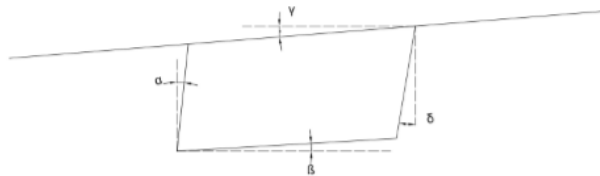


Figura 13: Ángulos para el cálculo de la distorsión

En las tablas 03 y 04 se han expuesto, del cajón izquierdo y derecho respectivamente, tanto los ángulos definidos en la figura 13, como el valor de la distorsión de cada uno de los cajones a lo largo de la luz del puente (hasta la mitad, ya que el resto es simétrico).

Distancia desde el apoyo (eje X)	α (rad)	β (rad)	γ (rad)	δ (rad)	Distorsión (rad)
0	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
5	0,000038	0,000221	0,000220	0,000058	0,000268
10	0,000103	0,000462	0,000462	0,000058	0,000542
15	0,000197	0,000716	0,000716	0,000256	0,000942
17	0,000232	0,000806	0,000807	0,000297	0,001071
18	0,000247	0,000845	0,000845	0,000311	0,001124
19	0,000260	0,000874	0,000877	0,000321	0,001166
20	0,000265	0,000887	0,000923	0,000324	0,001199

Tabla 03: Ángulos y distorsión a lo largo de la luz del modelo de ref. del cajón izquierdo

Distancia desde el apoyo (eje X)	α (rad)	β (rad)	γ (rad)	δ (rad)	Distorsión (rad)
0	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
5	0,000004	0,000033	0,000032	0,000001	0,000035
10	0,000007	0,000060	0,000060	0,000003	0,000065
15	0,000006	0,000079	0,000078	0,000005	0,000084
17	0,000005	0,000083	0,000083	0,000006	0,000088
18	0,000005	0,000084	0,000084	0,000006	0,000089
19	0,000005	0,000085	0,000085	0,000006	0,000090
20	0,000006	0,000085	0,000085	0,000007	0,000091

Tabla 04: Ángulos y distorsión a lo largo de la luz del modelo de ref. del cajón derecho

Como se puede apreciar en la figura 14, en la sección central se alcanza el valor máximo de la distorsión. Pero este valor se da en el cajón directamente cargado ya que, como se puede ver, en el cajón derecho, el valor de la distorsión es mucho menor, incluso en la sección central.

Es decir, al ser mayor la distorsión en el cajón cargado que en el derecho, las tensiones longitudinales serán mayores en éste, como se verá más adelante. Además, se ve claramente en la figura 14 la distribución apuntada que tiene la distorsión en las inmediaciones de la carga, la cual se disipa rápidamente.

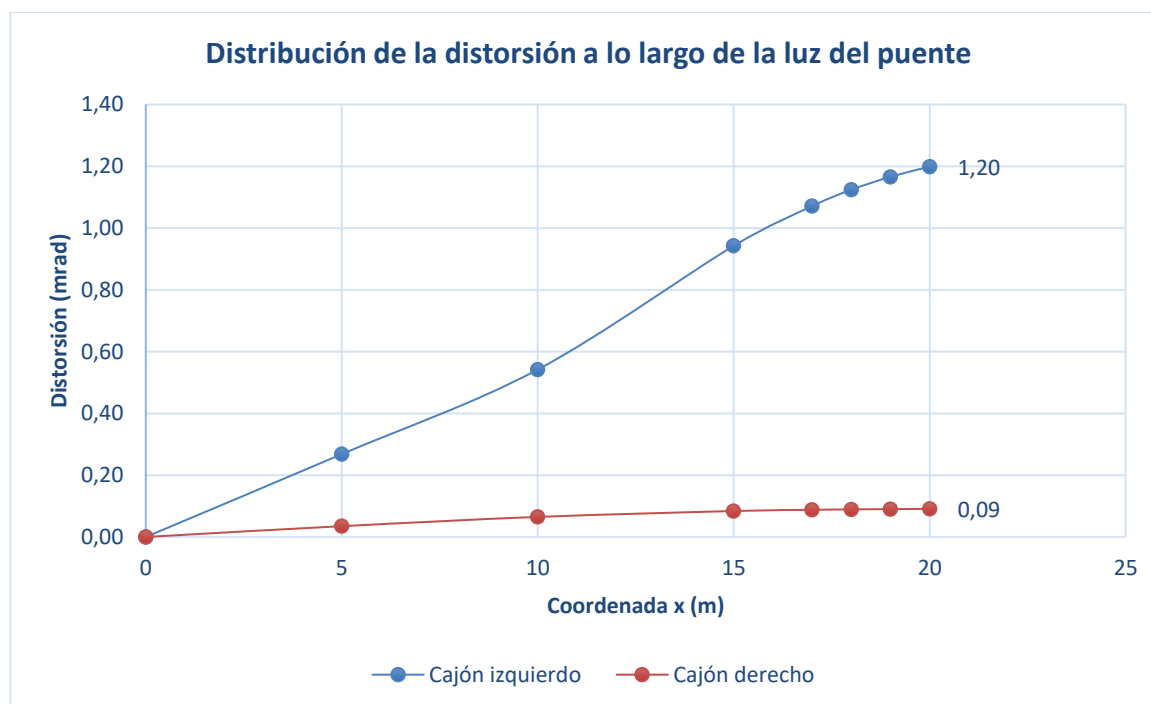


Figura 14: Distorsión de los dos cajones a lo largo de la luz (estudio de D. Javier Manterola)

3.2.3 Esfuerzos

A lo largo de la línea de unión de las dos vigas cajón, aparecen cuatro tipos de esfuerzos que se pueden agrupar de dos en dos. En primer lugar, se tienen los esfuerzos Q_y y M_y , que proporcionan el efecto tipo losa del intercambio de esfuerzos entre los dos cajones. Los dos segundos, N_y y N_{xy} , representan el efecto tipo membrana de la losa superior.

En el caso de la carga que estamos considerando, el momento M_y es prácticamente despreciable ya que, a lo largo del eje del puente, alcanza un valor máximo de 0.272 kNm/m, en la sección $x=20$ m, como se puede ver en la figura 15.

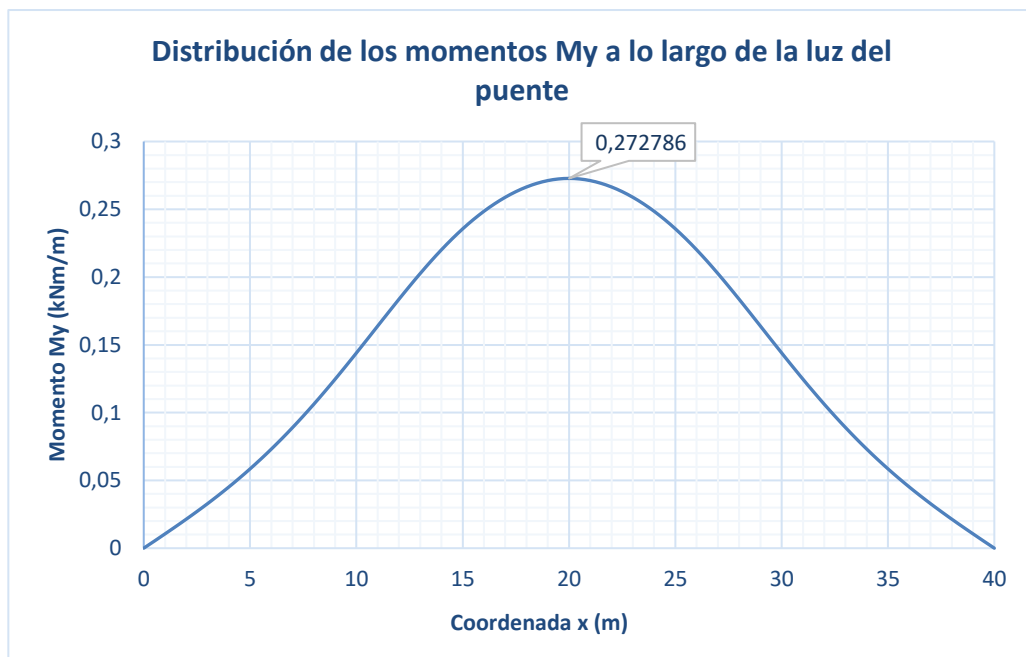


Figura 15: Distribución de los momentos M_y a lo largo de la luz (estudio de D. Javier Manterola)

Teniendo esto en cuenta, el efecto losa queda representado únicamente por el esfuerzo cortante Q_y , representado en la figura 16 que se muestra a continuación.

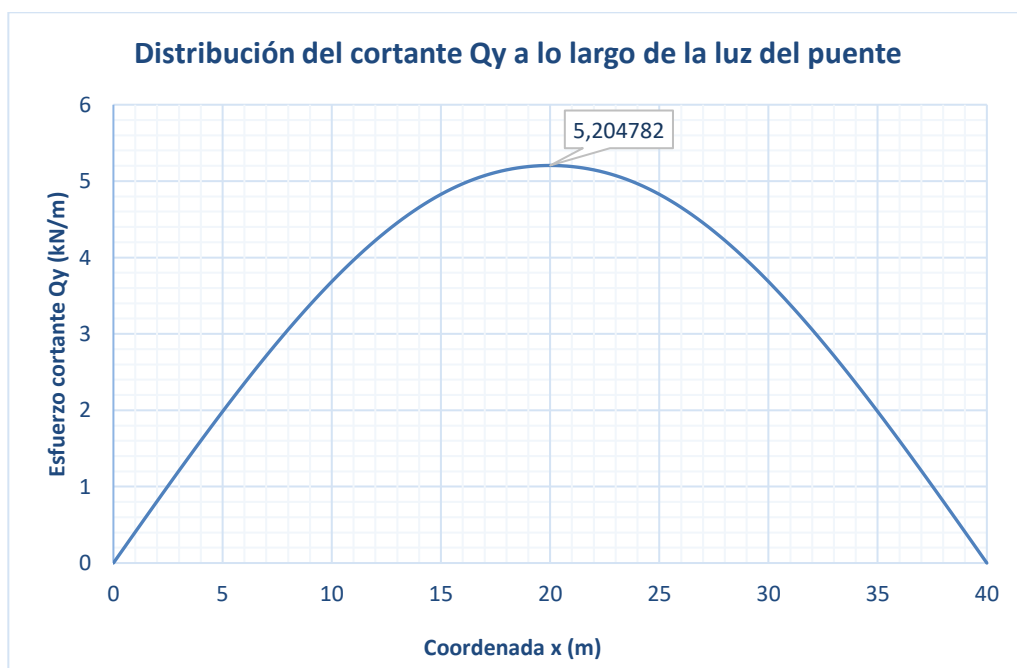


Figura 16: Distribución del cortante Q_y a lo largo de la luz (estudio de D. Javier Manterola)

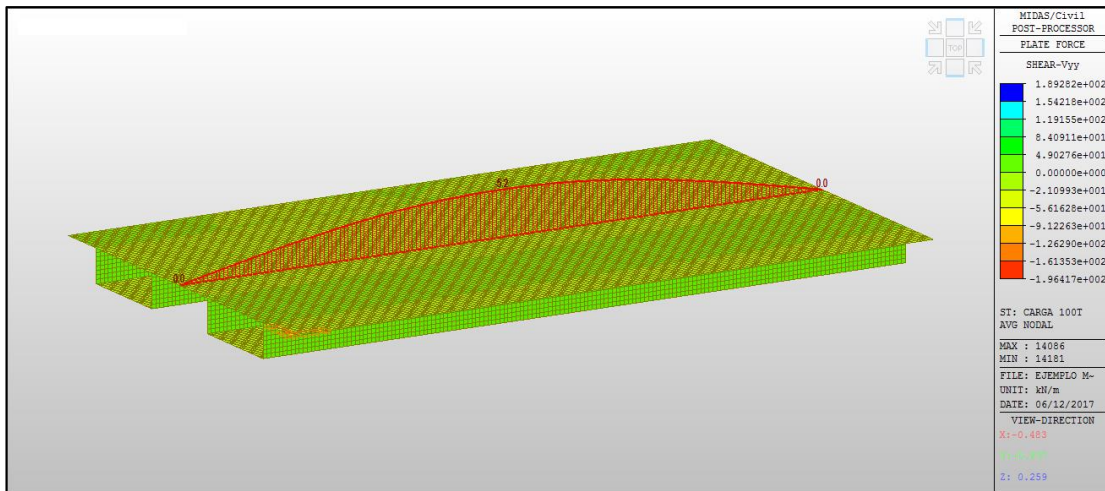


Figura 17: Distribución del cortante Q_y a lo largo de la luz representada con Midas (estudio de D. Javier Manterola)

Como se señala en la gráfica anterior (figura 16), el valor máximo del esfuerzo cortante se obtiene en la sección central (sección en la que se aplica la carga), y alcanza un valor de 5.2 kN/m. El valor mínimo se da en los extremos del puente, con un valor nulo.

De la misma forma se han representado los esfuerzos que proporcionan el efecto membrana: N_y y N_{xy} , correspondientes a las figuras 18 y 20, respectivamente. En las propias gráficas se han marcado los valores más relevantes, que más adelante se usarán para compararlos con el resto de casos del estudio.

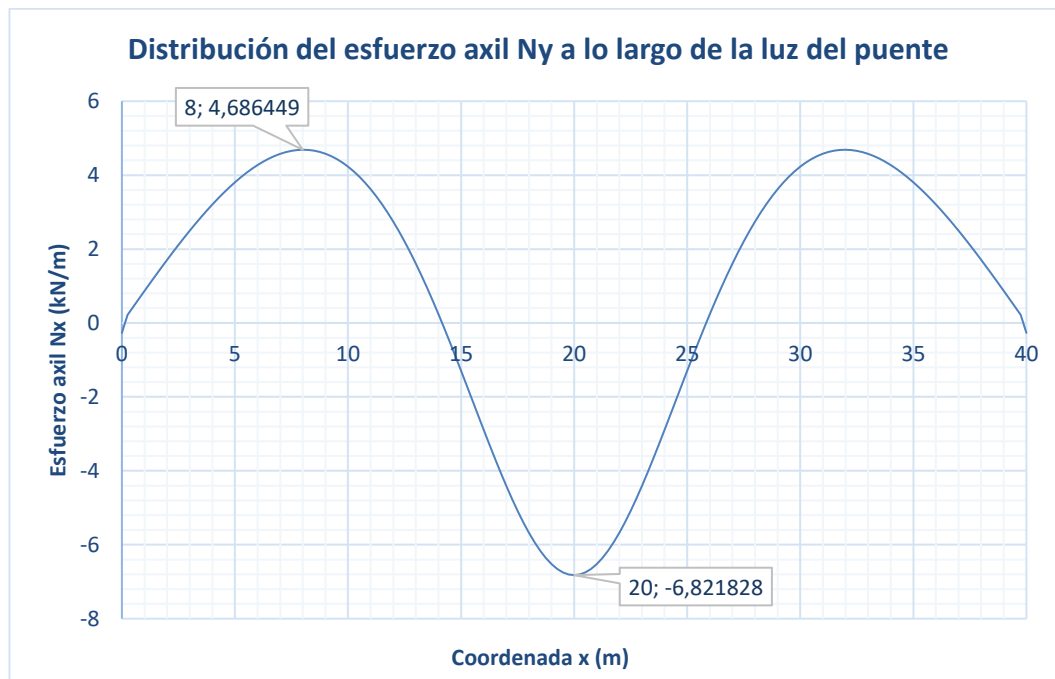


Figura 18: Distribución del axil N_y a lo largo de la luz (estudio de D. Javier Manterola)

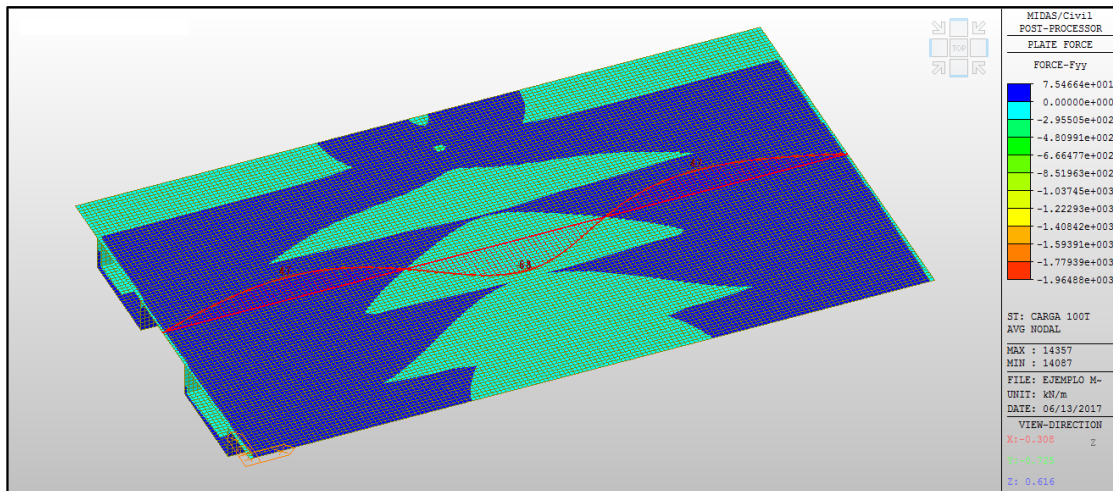


Figura 19: Distribución del axil N_y a lo largo de la luz representada con Midas (estudio de D. Javier Manterola)

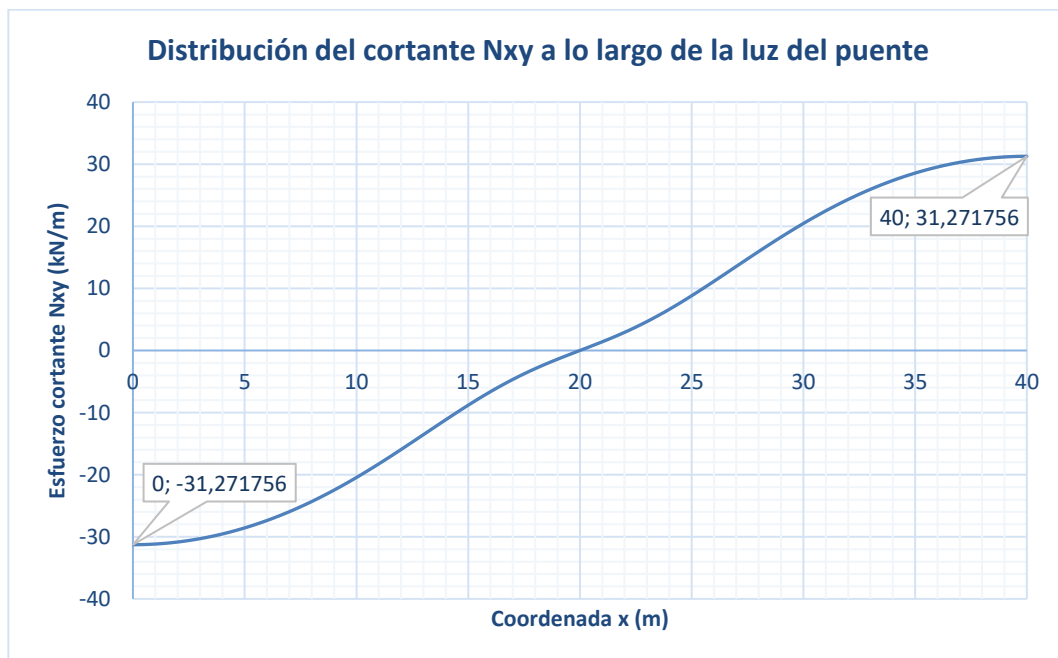


Figura 20: Distribución del cortante N_{xy} a lo largo de la luz (estudio de D. Javier Manterola)

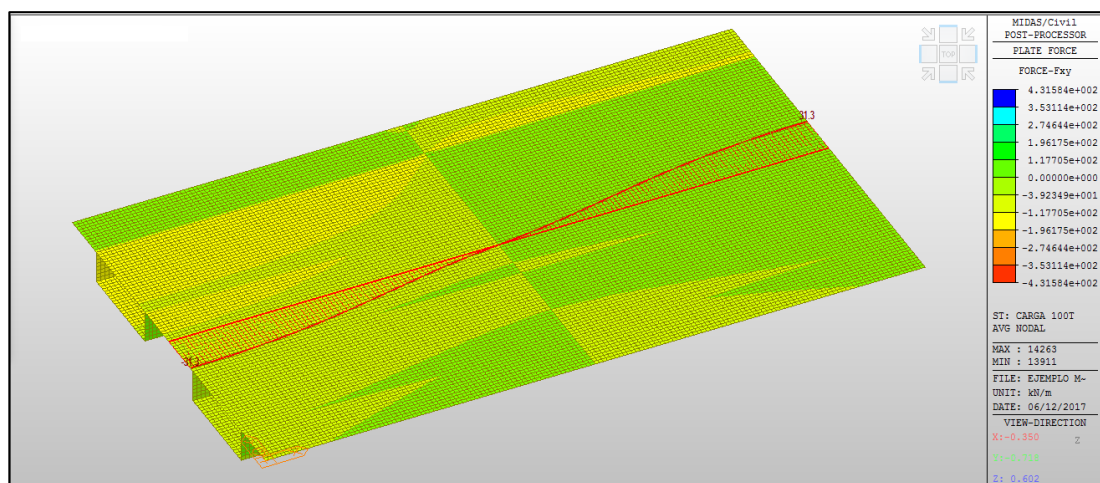


Figura 21: Distribución del cortante N_{xy} a lo largo de la luz representada con Midas (estudio de D. Javier Manterola)

Como se puede ver, claramente los esfuerzos correspondientes al efecto losa son los que tienen una menor influencia sobre la respuesta resistente. La cuantía del esfuerzo Q_y depende de la relación entre la rigidez de la losa y la rigidez de los dos cajones. Debido a las dimensiones de la estructura que estamos considerando, la cuantía de este esfuerzo es muy pequeña.

En cambio, los valores alcanzados por N_{xy} son considerables, y es el que realmente produce un estado tensional longitudinal en la viga no cargada y una descarga en la viga directamente cargada.

Como se puede ver en la figura 20, el valor de N_{xy} en la sección central es cero. El cajón cargado no se deforma longitudinalmente en este punto, y crece hacia el apoyo, como corresponde a cualquier cortante en una viga biapoyada.

Por último, se adjuntan las gráficas de los esfuerzos obtenidos por D. Javier Manterola en su estudio, donde se puede apreciar la similitud con las gráficas obtenidas mediante el programa Midas:

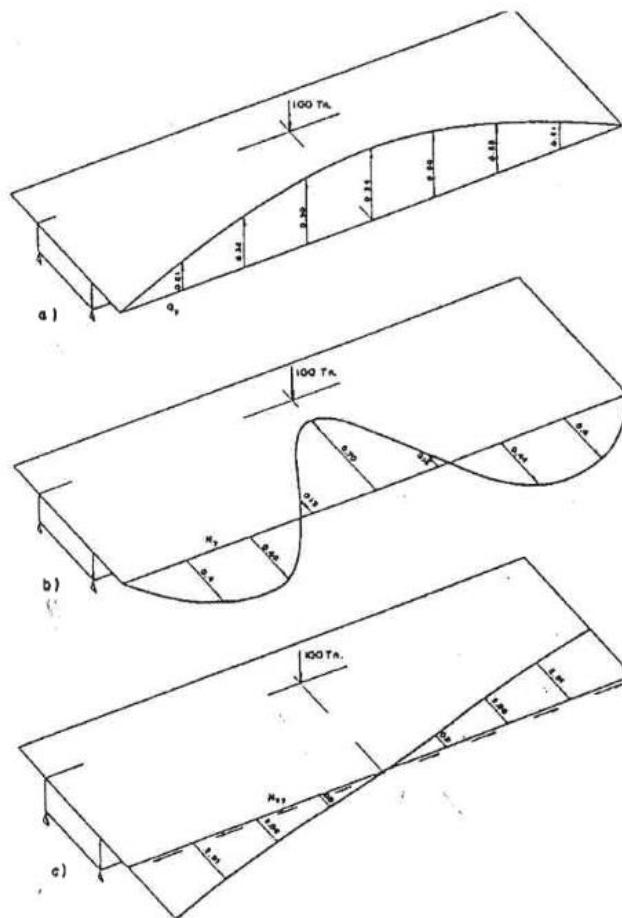


Figura 22: Esfuerzos obtenidos por D. Javier Manterola en su estudio

3.2.4 Tensiones

En este punto se van a analizar las tensiones normales y tangenciales, prestando especial atención a la sección directamente cargada donde, como se verá más adelante, se producirán las mayores tensiones normales.

La tensión normal provoca una gran perturbación en el punto de aplicación de la carga, que se va atenuando y distribuyendo conforme nos alejamos de dicho punto. En la siguiente gráfica (figura 23) se han representado las tensiones normales, a lo largo de la luz del puente, de los nudos 2, 3, 5 y 6.

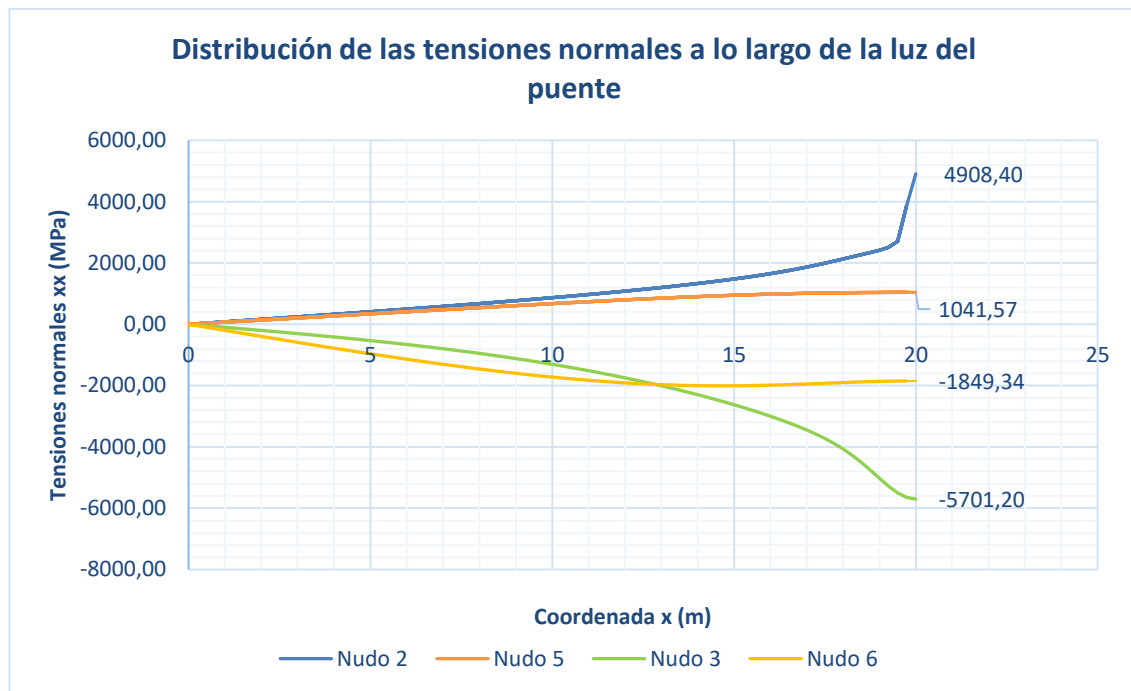


Figura 23: Distribución de σ_{xx} (MPa) a lo largo de la luz (estudio de D. Javier Manterola)

Como se ve en la gráfica anterior, la tensión de compresión máxima se da en el nudo 2 de la sección central, mientras que la tensión máxima de tracción se encuentra en el nudo 5 de la sección central, perteneciendo ambos puntos a la misma alma. Al alejarnos de la sección, se puede ver también en la gráfica que las tensiones se reducen considerablemente, ya que en el alma derecha del mismo cajón (cajón izquierdo) las tensiones se reducen hasta un quinto de los valores en el alma izquierda.

Como obtiene D. Javier Manterola en su estudio, también se han obtenido las tensiones normales en las secciones $x=20$ m y $x=15$ m (figuras 24 y 25). Con ambas figuras se aprecia lo dicho anteriormente: la distribución de tensiones normales es mayor cuanto más nos acercamos al punto de aplicación de la carga, mientras que, al alejarse, disminuyen.

Como se puede ver, en la sección $x=15$ m las tensiones son mucho menores que en la sección central, donde se dan los valores máximos.

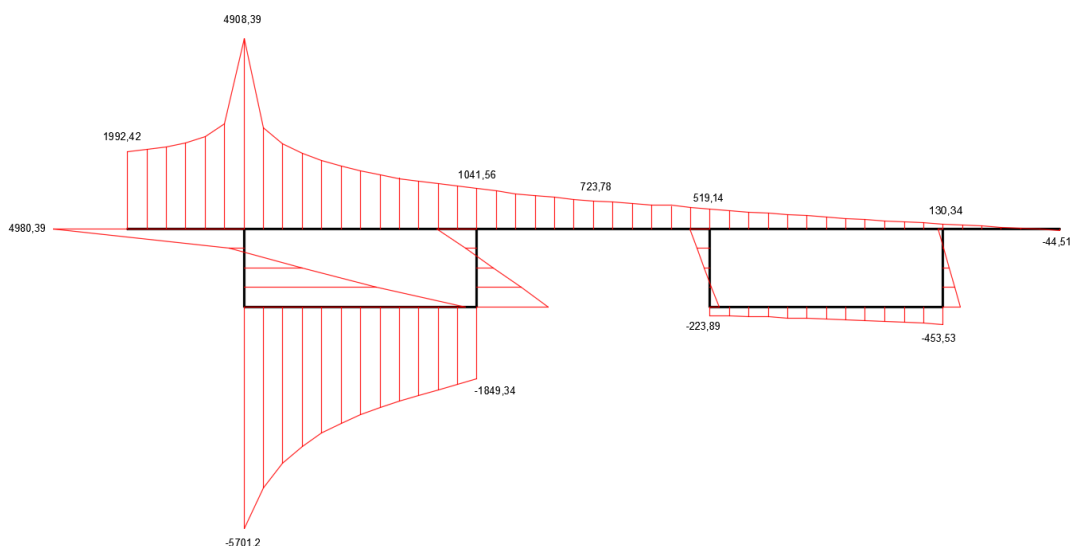


Figura 24: Distribución de las tensiones de σ_{xx} (MPa) en la sección central ($x=20$ m) del estudio de D. Javier Manterola

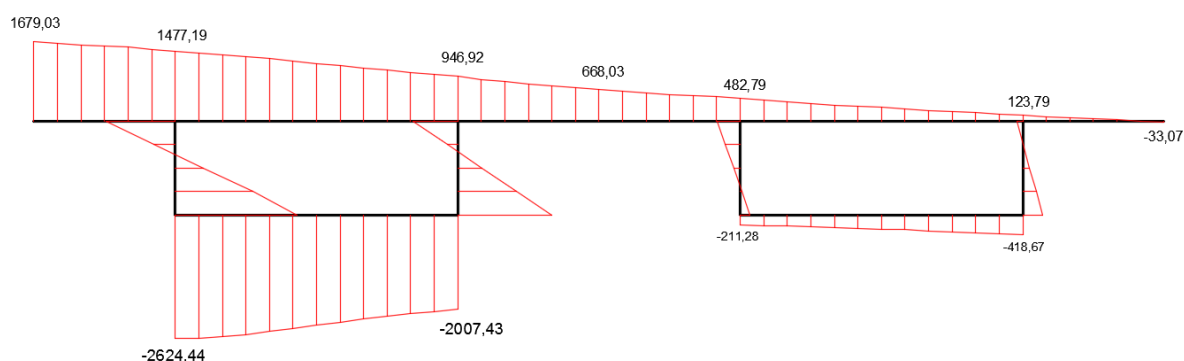


Figura 25: Distribución de las tensiones de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=15$ m del estudio de D. Javier Manterola

En la siguiente imagen (figura 26) se representan las tensiones tangenciales τ_{xy} (MPa) en los nudos 2, 3, 5 y 6. Como se puede ver, las tensiones tangenciales de los nudos 2 y 3, en la sección central, son mayores que la de los nudos 5 y 6. Como es lógico, las tensiones tangenciales en el alma cargada son mayores que en el resto del puente. Además, se ve claramente que éstas se disipan al alejarnos del punto de aplicación de la carga.

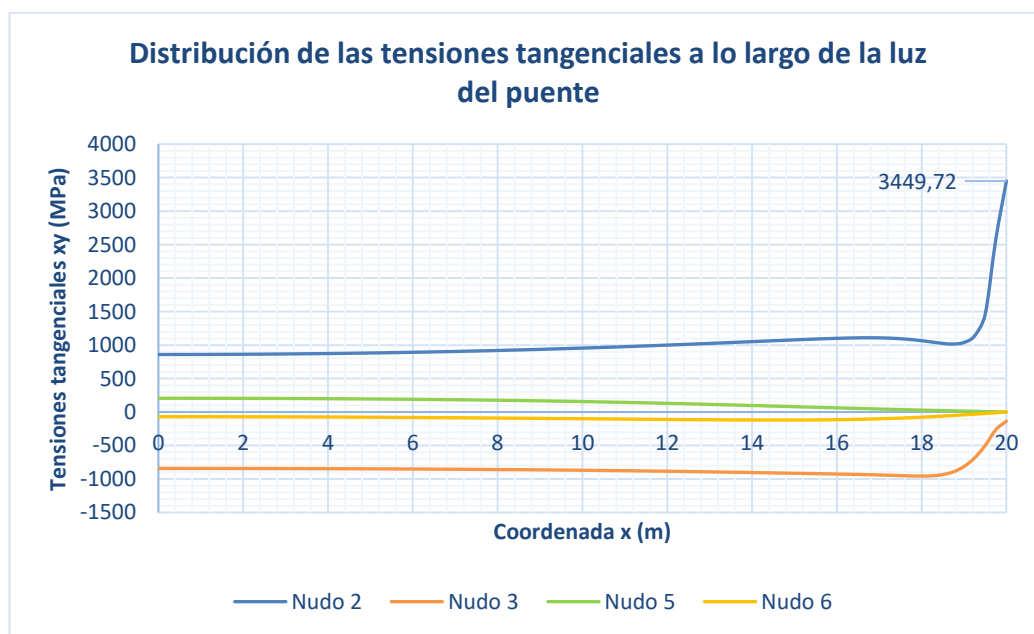


Figura 26: Distribución de τ_{xy} (MPa) a lo largo de la luz (estudio de D. Javier Manterola)

Por último, se han estudiado las tensiones tangenciales τ_{xy} tanto en la sección $x=19.5$ m y en la sección $x=10$ m, para poder compararlas con los valores obtenidos por D. Javier Manterola.



Figura 27: Distribución de las tensiones de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=19.5$ m del estudio de D. Javier Manterola

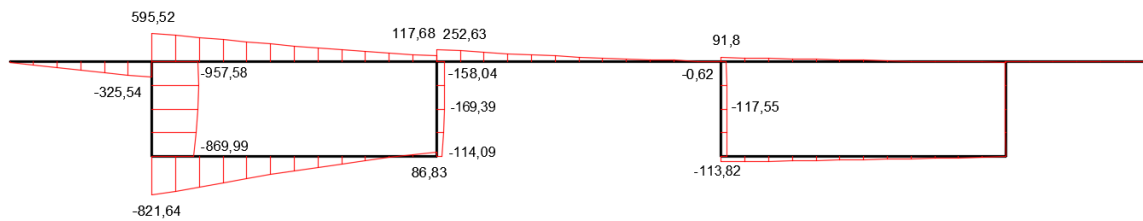


Figura 28: Distribución de las tensiones de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=10$ m del estudio de D. Javier Manterola

En las anteriores representaciones (figuras 27 y 28) se puede ver lo que se ha comentado anteriormente sobre la distribución de las tensiones tangenciales: éstas son mucho más uniforme en secciones alejadas de la sección central, a la vez que empiezan a aparecer en el cajón derecho.

Se incluyen en las imágenes siguientes los resultados obtenidos por D. Javier Manterola, y como se puede apreciar, los resultados son semejantes a los obtenidos con el programa Midas Civil^[3]. Sin embargo, la distribución de las tensiones tangenciales en el alma izquierda del cajón izquierdo, para la sección $x=19.5$ m, no coincide con la solución propuesta por D. Javier Manterola. En su estudio, el máximo se obtiene justo debajo de la losa superior, mientras que, en el modelo hecho con Midas, el valor máximo se da a 0.5 metros de la losa superior.

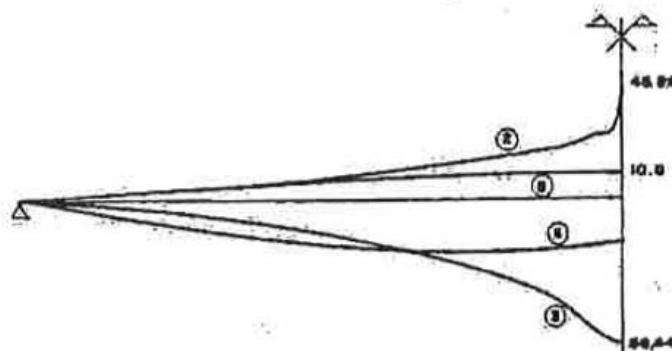


Figura 29: Distribución de σ_{xx} (MPa) a lo largo de la luz en los nudos 2, 3, 5 y 6, obtenida por D. Javier Manterola

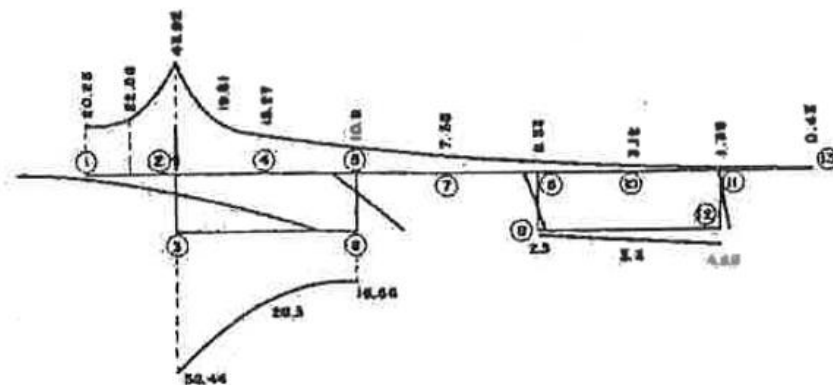


Figura 30: Distribución de σ_{xx} (MPa) en el centro de la luz ($x=20$ m), obtenida por D. Javier Manterola

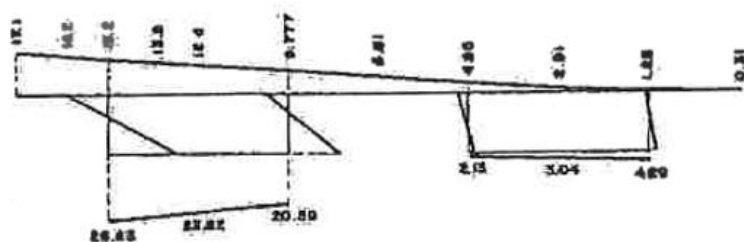


Figura 31: Distribución de σ_{xx} (MPa) para $x=15m$, obtenida por D. Javier Manterola

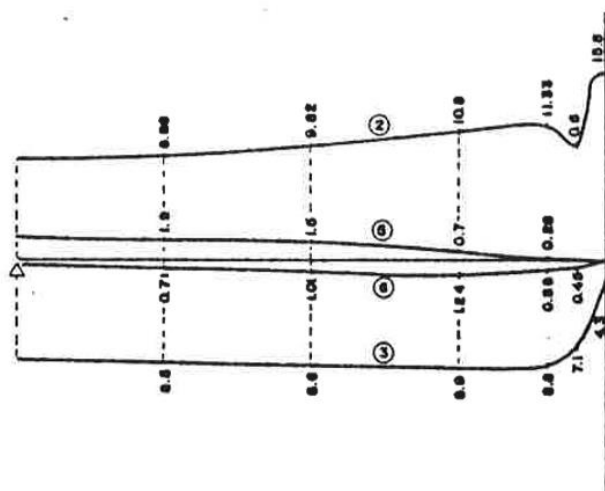


Figura 32: Distribución de τ_{xy} (MPa) a lo largo de la luz en los nudos 2, 3, 5 y 6, obtenida por D. Javier Manterola

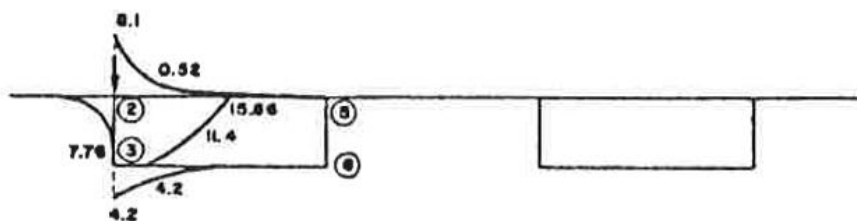


Figura 33: Distribución de τ_{xy} (MPa) para $x=19.5m$, obtenida por D. Javier Manterola

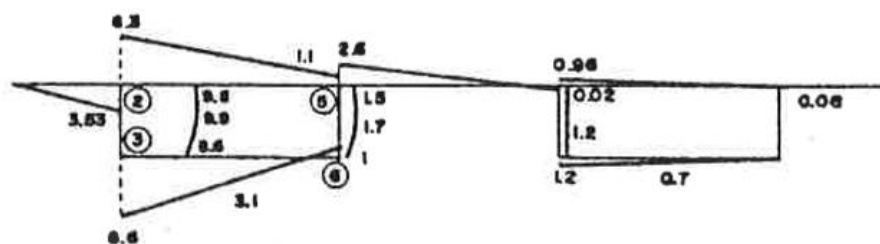


Figura 34: Distribución de τ_{xy} (MPa) para $x=10m$, obtenida por D. Javier Manterola

4 ESTUDIO PARAMÉTRICO Y EL COMPORTAMIENTO DE UN TABLERO FORMADO POR DOS VIGAS CAJÓN

En este capítulo se estudiará la influencia que tienen los parámetros geométricos escogidos en el comportamiento resistente del puente formado por dos vigas cajón.

Al igual que analiza D. Javier Manterola en su libro, se analizarán desplazamientos, distorsión, esfuerzos y tensiones cuando se varía una de las características geométricas del puente, y se compararán los resultados con los obtenidos por el autor. El presente capítulo muestra los resultados obtenidos y su descripción, además de poner de manifiesto la relación existente entre el comportamiento del puente con los parámetros geométricos de cada caso.

4.1 Caso 1: Variación de la luz

4.1.1 Descripción del modelo

Como se ha expuesto en el capítulo 2 de este trabajo, en este apartado se obtendrán los resultados de un puente como el que propone D. Javier Manterola en su libro, pero aumentado la luz del mismo cada 5 metros hasta llegar a una longitud de 80 metros. Por lo tanto, se tiene un total de 8 modelos para estudiar la influencia de la luz en el comportamiento del puente.

4.1.2 Resultados obtenidos en el caso 1

4.1.2.1 Desplazamientos

La distribución de los desplazamientos es análoga a la que se obtiene en el modelo de referencia. Por ello, aquí sólo se incluyen los resultados de cuatro de los ocho modelos que se han estudiado: los correspondientes a 45, 60 y 80 metros de luz.

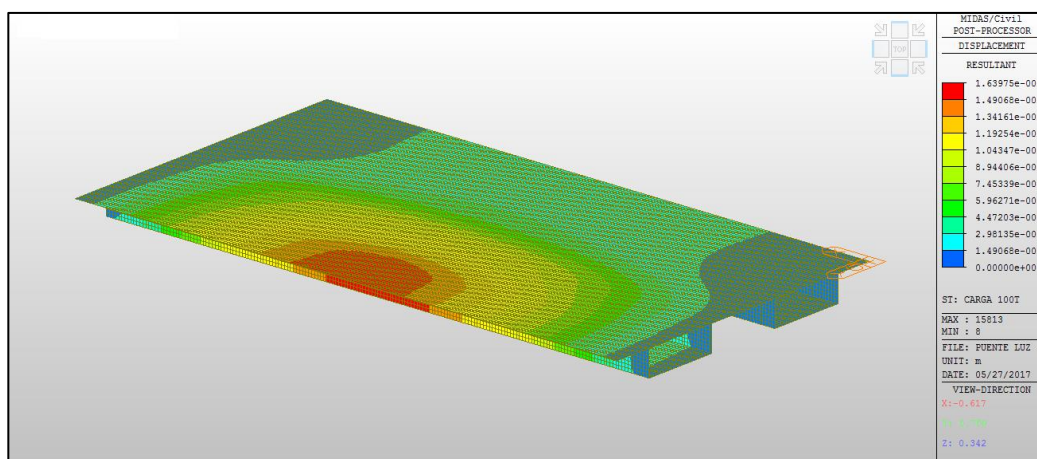


Figura 35: Desplazamientos (m) del modelo de 45 metros de luz

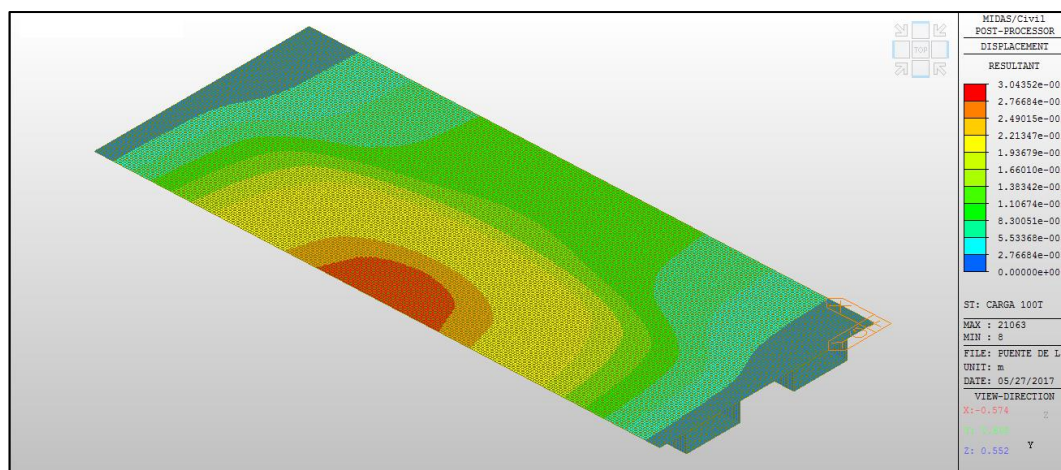


Figura 36: Desplazamientos (m) del modelo de 60 metros de luz

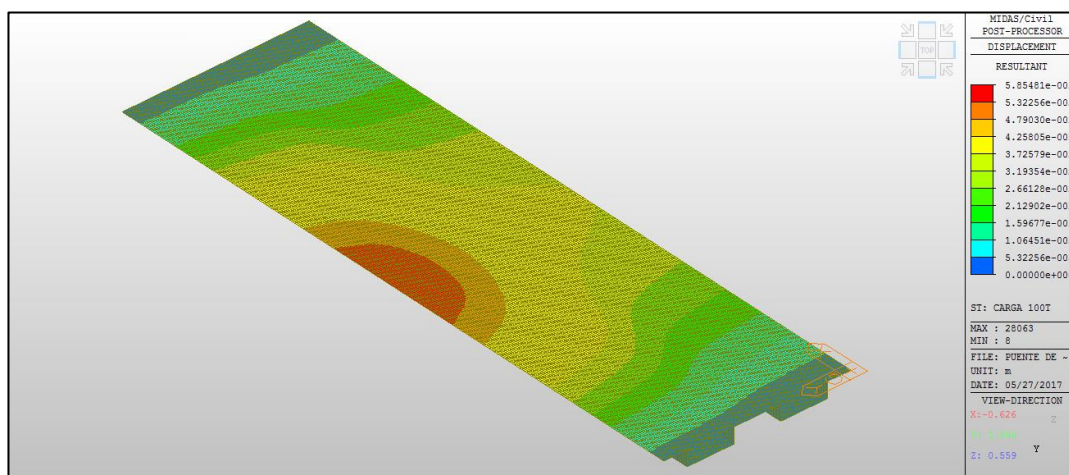


Figura 37: Desplazamientos (m) del modelo de 80 metros de luz

Como se observa en las figuras anteriores, la zona de influencia de la carga se hace mayor al incrementar la luz del puente, aumentando los desplazamientos, sobre todo, en el cajón derecho.

En las siguientes gráficas se representan los desplazamientos verticales de las cuatro esquinas de ambos cajones (de la sección central) cuando se varía la luz del puente.

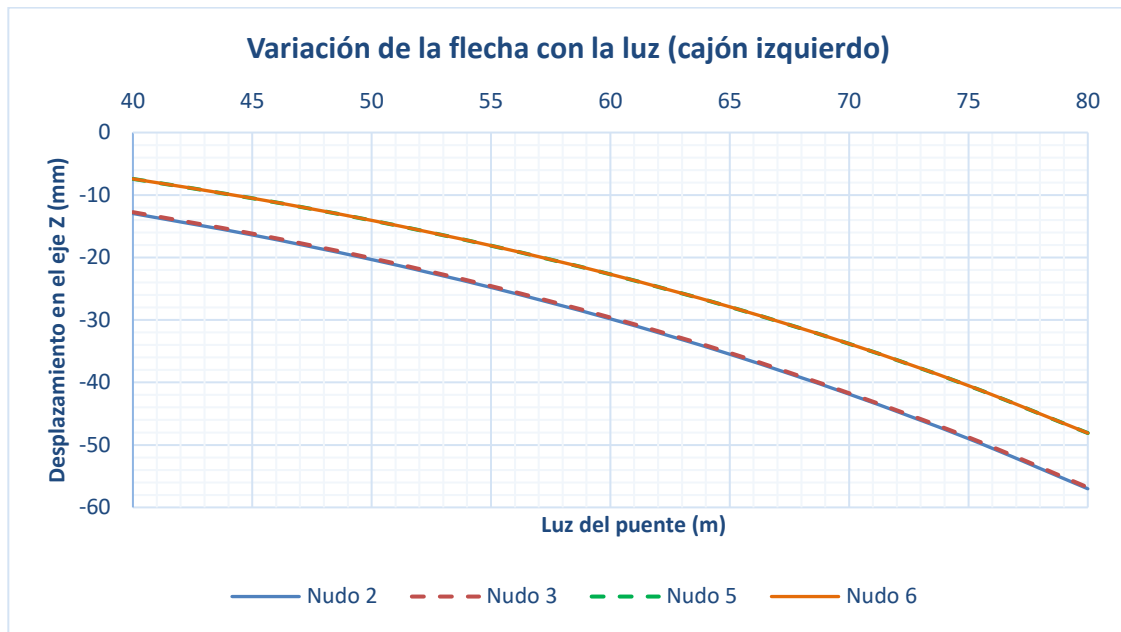


Figura 38: Desplazamientos verticales del cajón izquierdo al variar la luz del puente

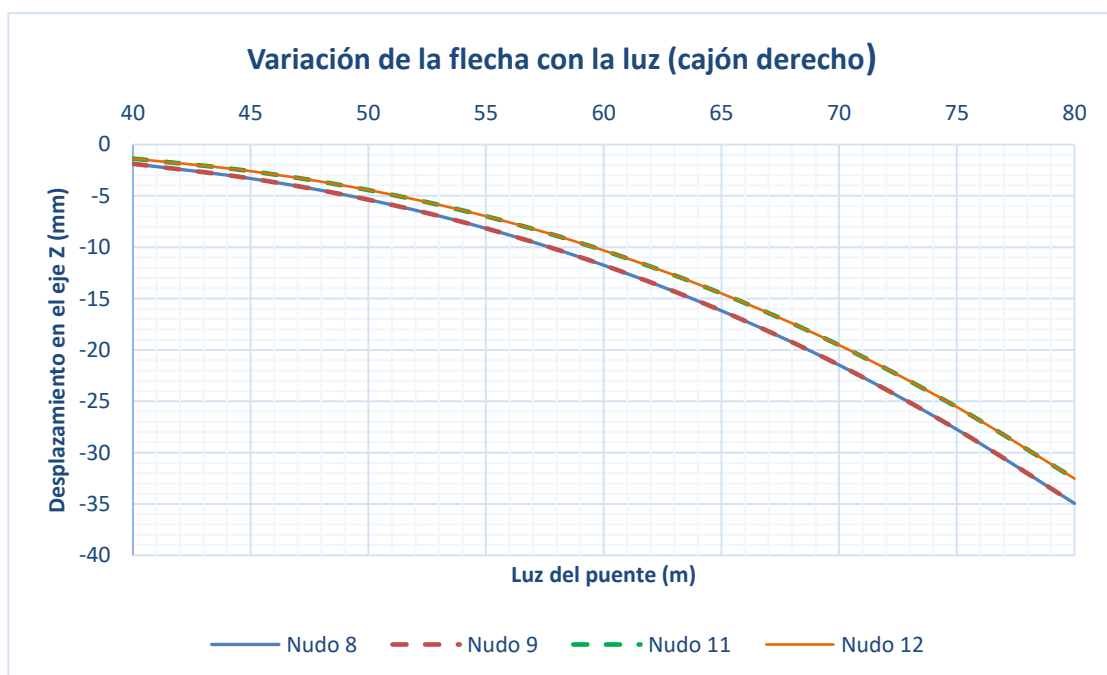


Figura 39: Desplazamientos verticales del cajón derecho al variar la luz del puente

En el cajón izquierdo (figura 38) la diferencia de los desplazamientos entre el alma izquierda y el alma derecha se mantiene aproximadamente constante. Sin embargo, esa diferencia sí varía en el cajón derecho, siendo prácticamente nula para luces menores y aumentando conforme se aumenta la luz del puente (figura 39), tal y como se ha visto en las figuras 35, 36 y 37.

Además, y como es lógico, la flecha es mayor en el cajón cargado (cajón izquierdo) que en el cajón derecho.

Con todo esto, podemos concluir con la relación que se muestra en la siguiente gráfica (figura 40): la relación luz-flecha máxima se puede aproximar con un polinomio de orden dos. Es decir, la flecha aumenta con la luz del puente al cuadrado.

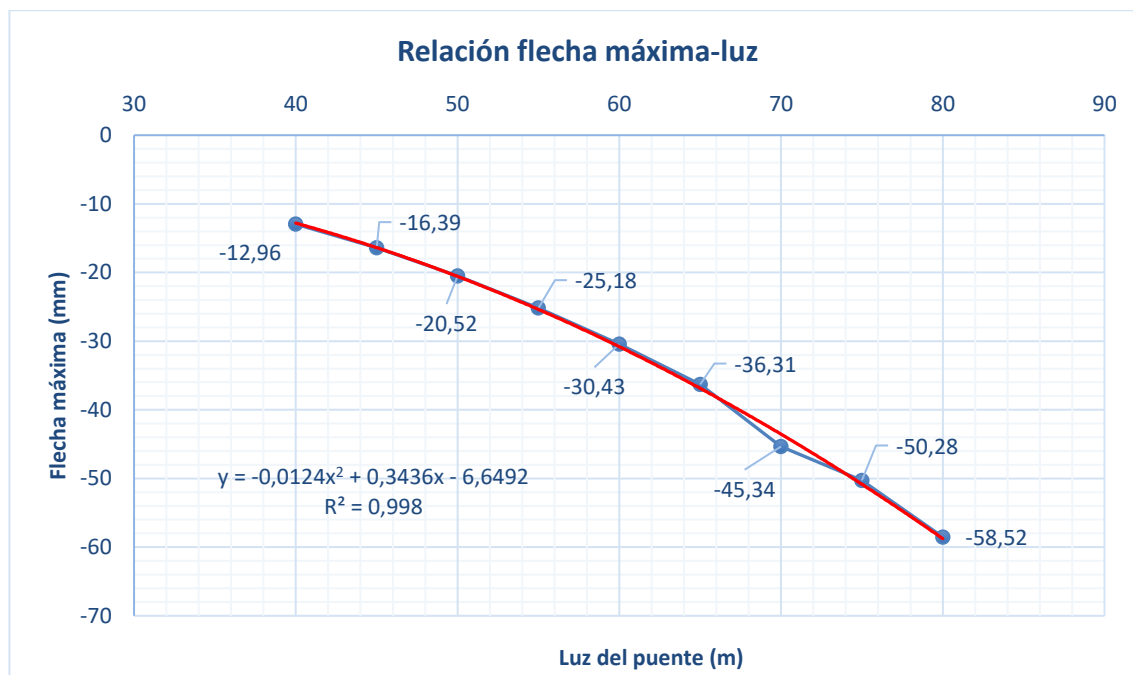


Figura 40: Relación flecha máxima-luz del puente

4.1.2.2 Distorsión

Resulta de gran interés conocer cuánto se deforma la sección del puente al variar su luz. Además, como se ha señalado en capítulos anteriores del presente trabajo, la distorsión tiene una influencia bastante grande en las tensiones longitudinales, y nos dará una idea previa de éstas.

Para el estudio de la distorsión, se ha escogido la sección central, que es la más representativa, de cada uno de los modelos.

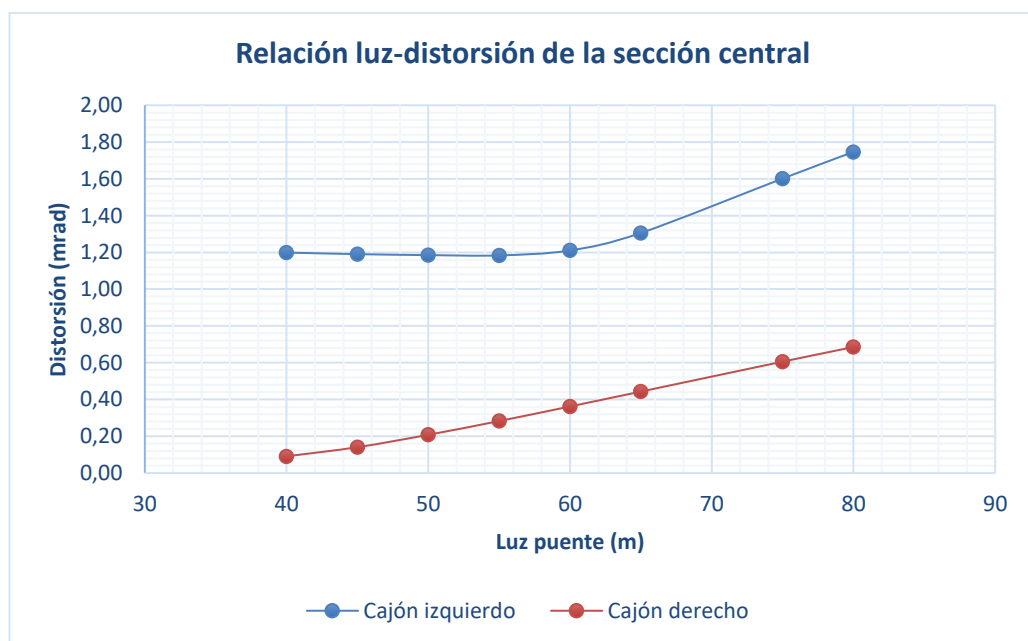


Figura 41: Relación luz-distorsión de la sección central

En la figura 41 se ha representado cómo varía la distorsión de la sección central cuando se aumenta la luz del puente, tanto para el cajón izquierdo como para el cajón derecho. El crecimiento de la distorsión del cajón derecho es prácticamente lineal cuando se aumenta la luz del puente. En cambio, el crecimiento de la distorsión del cajón izquierdo es más irregular, la cual, hasta una luz de 60 metros, permanece aproximadamente constante. A partir de este punto, comienza a crecer con pendiente constante.

Además, como se puede apreciar, la distorsión del cajón derecho es mucho menor, en todos los modelos, que la del cajón izquierdo, al igual que ocurría en el estudio de D. Javier Manterola.

4.1.2.3 Esfuerzos

Para el estudio de los esfuerzos, resulta de poca utilidad mostrar las gráficas de cada uno de los modelos realizados, ya que, como se verá, las distribuciones son análogas entre los casos. Tiene más interés el exponer cómo evolucionan cada uno de ellos y si todos tienen la misma influencia para cada uno de los casos estudiados.

Para ver cómo varía la distribución de esfuerzos con la luz, a continuación, se muestra, en cada gráfica, cada uno de los esfuerzos para 4 de los casos estudiados (45 m, 50 m, 60 m y 80 m de luz), además del modelo de referencia del estudio de D. Javier Manterola.

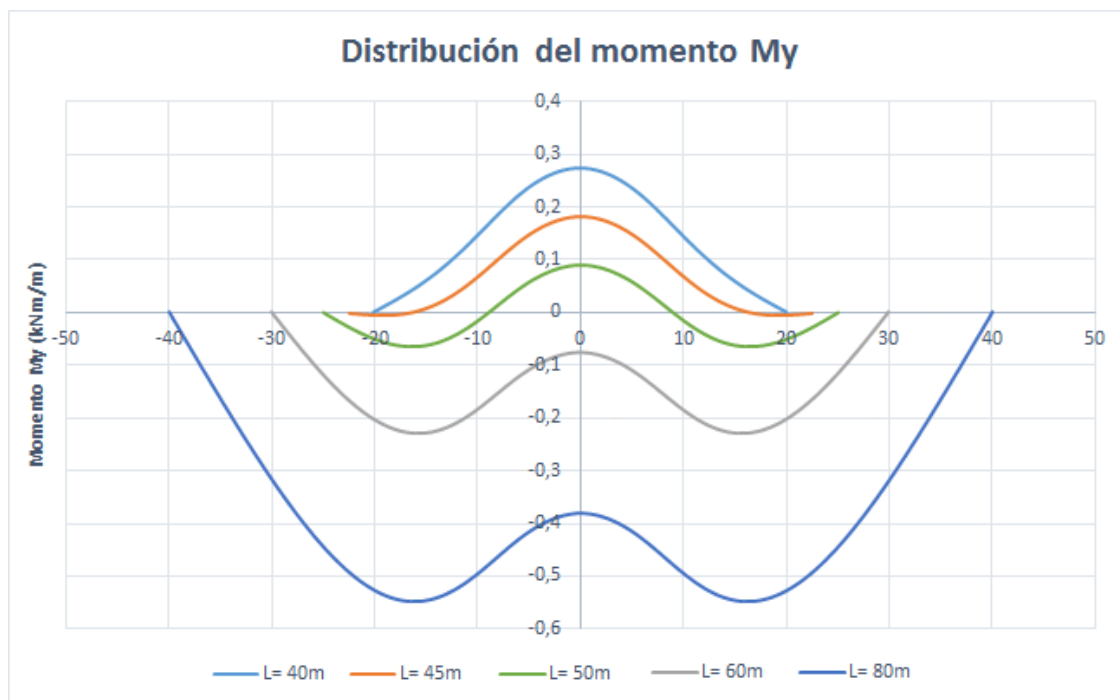


Figura 42: Distribución del momento M_y para los modelos de 40, 45, 50, 60 y 80 metros de luz

En todos los casos estudiados, el momento flector M_y es el esfuerzo que menos cuantía tiene en la respuesta resistente. En el caso de mayor luz (80 metros), alcanza un valor máximo de 0.54 kNm/m, siendo mucho menor que el resto de los esfuerzos, como veremos a continuación.

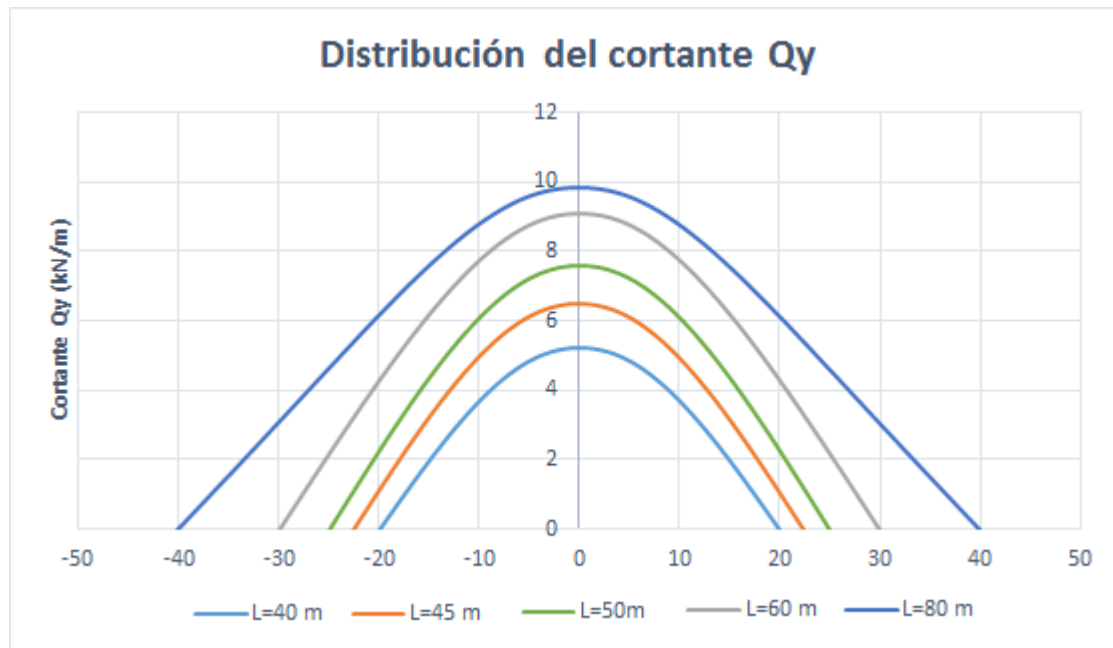


Figura 43: Distribución del cortante Q_y para los modelos de 40, 45, 50, 60 y 80 metros de luz

En cuanto a la distribución del cortante Q_y , como se puede apreciar, es muy parecida en todos los casos. Sin embargo, lo que para luces menores podría aproximarse a una parábola, para longitudes mayores, ésta tiende más bien a una función lineal.

Además, conforme se aumenta la longitud del puente, la diferencia entre los valores máximos (que se dan en todos los casos en la sección central), es menor. Esto es lo que se pone de manifiesto en la siguiente gráfica, en la que se puede ver que con un polinomio de orden dos se aproxima con bastante exactitud la evolución del valor máximo de Q_y .

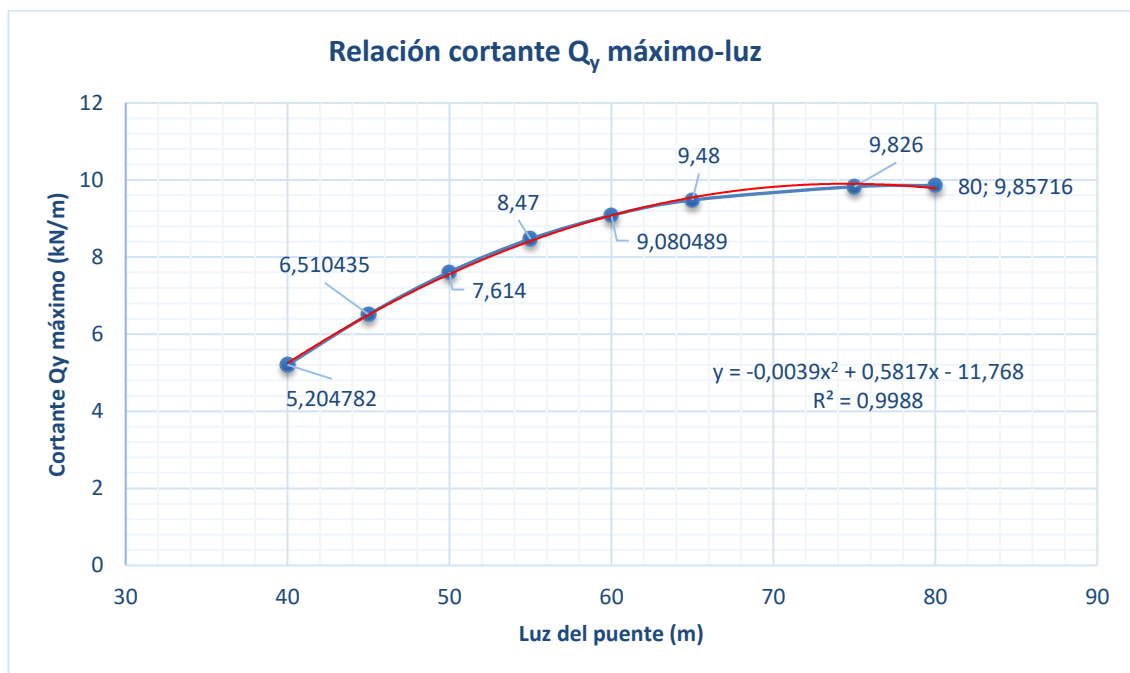


Figura 44: Relación cortante Q_y máximo-luz del puente

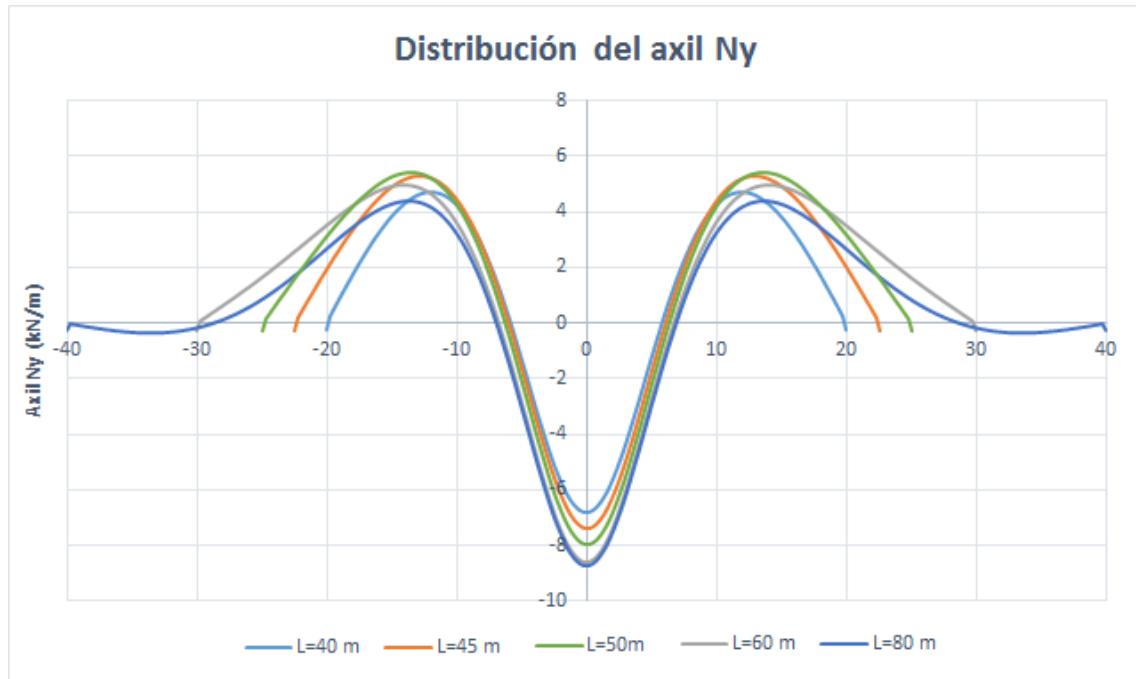


Figura 45: Distribución del axil N_y para los modelos de 40, 45, 50, 60 y 80 metros de luz

La distribución del axil N_y es la que más varía con el aumento de la luz.

Para luces más pequeñas (40 y 45 metros), el axil, desde el extremo, comienza siendo positivo. Aumenta hasta alcanzar su máximo valor positivo a, aproximadamente, un quinto de la luz. A partir de ese punto, comienza a disminuir hasta la mitad de la longitud del puente, donde se da el máximo valor negativo del esfuerzo N_y . Y en la otra mitad, la distribución es simétrica.

Para luces mayores, la distribución del axil tiene también una forma sinusoidal. En cambio, para estos casos, el esfuerzo comienza en los extremos con signo negativo, como se puede ver en la figura 45.

En la siguiente gráfica (figura 46) se ha representado la evolución de los valores máximo y mínimo del axil N_y para los diferentes modelos estudiados en el caso 1.

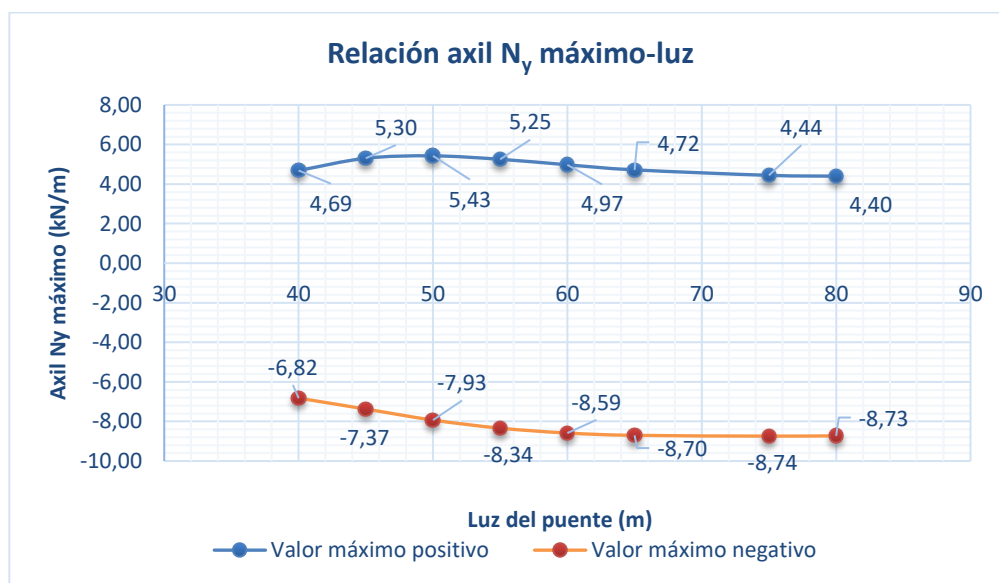


Figura 46: Relación axil N_y máximo-luz del puente

Como se puede apreciar, la variación de la luz no supone un cambio considerable en los valores máximos (tanto positivos como negativos) del esfuerzo axial N_y . Hay más diferencia en la evolución del valor máximo negativo, el cual aumenta al incrementar la luz del puente. Sin embargo, el valor máximo positivo, se mantiene más o menos constante en los modelos estudiados.

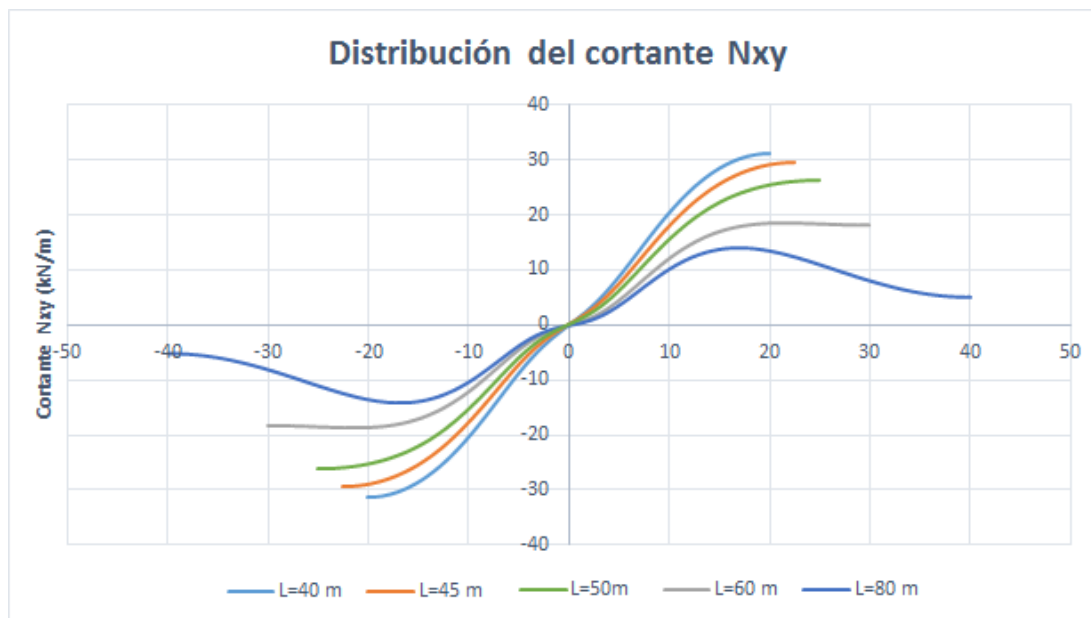


Figura 47: Distribución del cortante N_{xy} para los modelos de 40, 45, 50, 60 y 80 metros de luz

Por último, el cortante N_{xy} , para todos los casos, tiene valor nulo en la sección central. Mientras que en luces menores alcanza su valor máximo en el extremo y disminuye hasta el centro, para luces mayores su valor máximo no se encuentra en los apoyos, sino en puntos intermedios entre éstos y la sección central.

En la siguiente tabla se representa el valor máximo de N_{xy} que se alcanza y el punto en el que se da.

Luz (m)	Coordenada x (m)	Valor N_{xy} (kN/m)
40	0	31,27
45	0	29,49
50	0	26,26
60	8,5	18,65
80	23	14,16

Tabla 05: Valores máximos de N_{xy} y sección en el que se alcanza

Como se ha comentado, el valor máximo, a medida que se aumenta la luz del puente, se encuentra cada vez más cerca de la sección central.

Representando la evolución del esfuerzo N_{xy} (figura 48), queda reflejada la influencia que tiene la luz del puente en este esfuerzo, disminuyendo considerablemente al aumentar dicho parámetro. Este fuerte decrecimiento se produce hasta que el puente alcanza una longitud de 65 metros. A partir de este punto, el valor máximo de N_{xy} continúa disminuyendo, pero más suavemente.

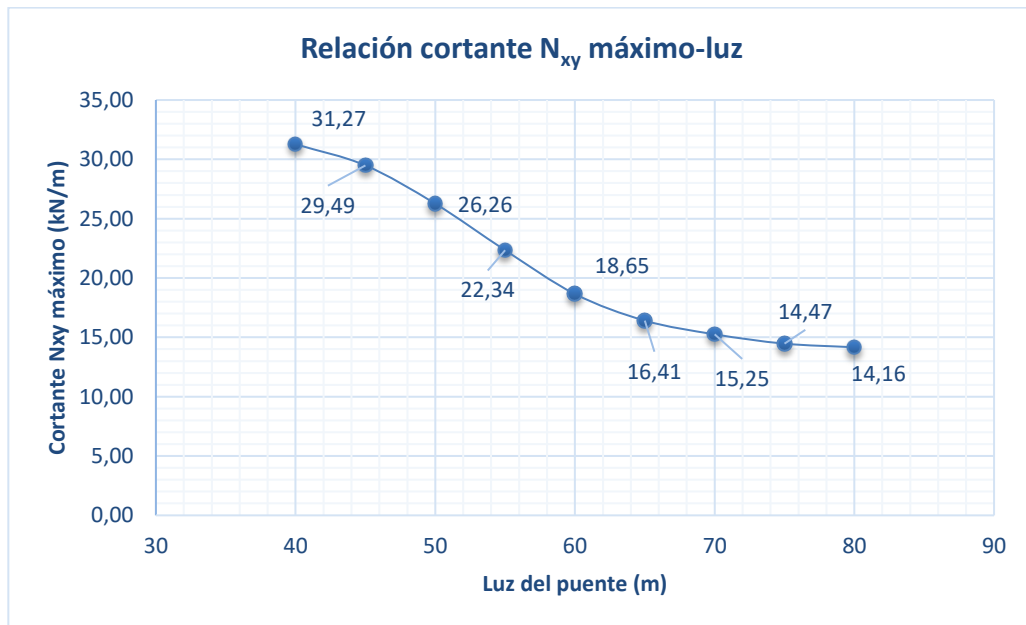


Figura 48: Relación cortante N_{xy} máximo-luz del puente

4.1.2.4 Tensiones

Para el estudio de las tensiones, se verá cómo varían en el cajón directamente cargado a lo largo de toda la longitud del puente. Además, en las secciones transversales que resulten más representativas, se analizarán cómo se distribuyen las tensiones, tanto las normales como las tangenciales.

4.1.2.4.1 Tensiones normales

Al igual que en los apartados anteriores, hemos escogido únicamente algunos casos para representar la variación de las tensiones normales a lo largo de la luz. Esto es lo que se expone en las figuras 49, 50, 51 y 52.

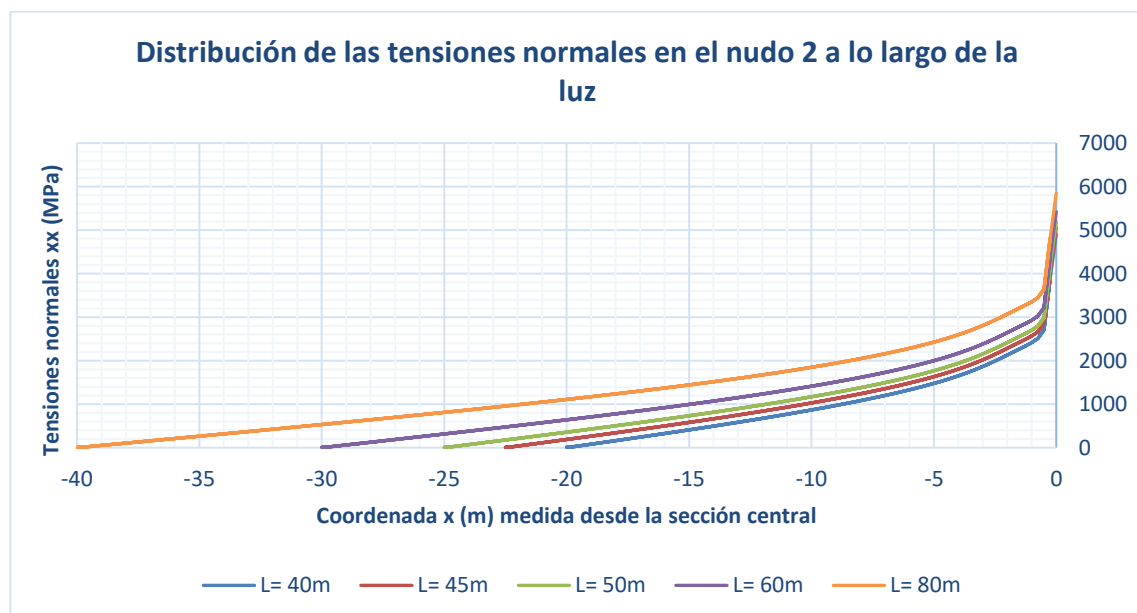
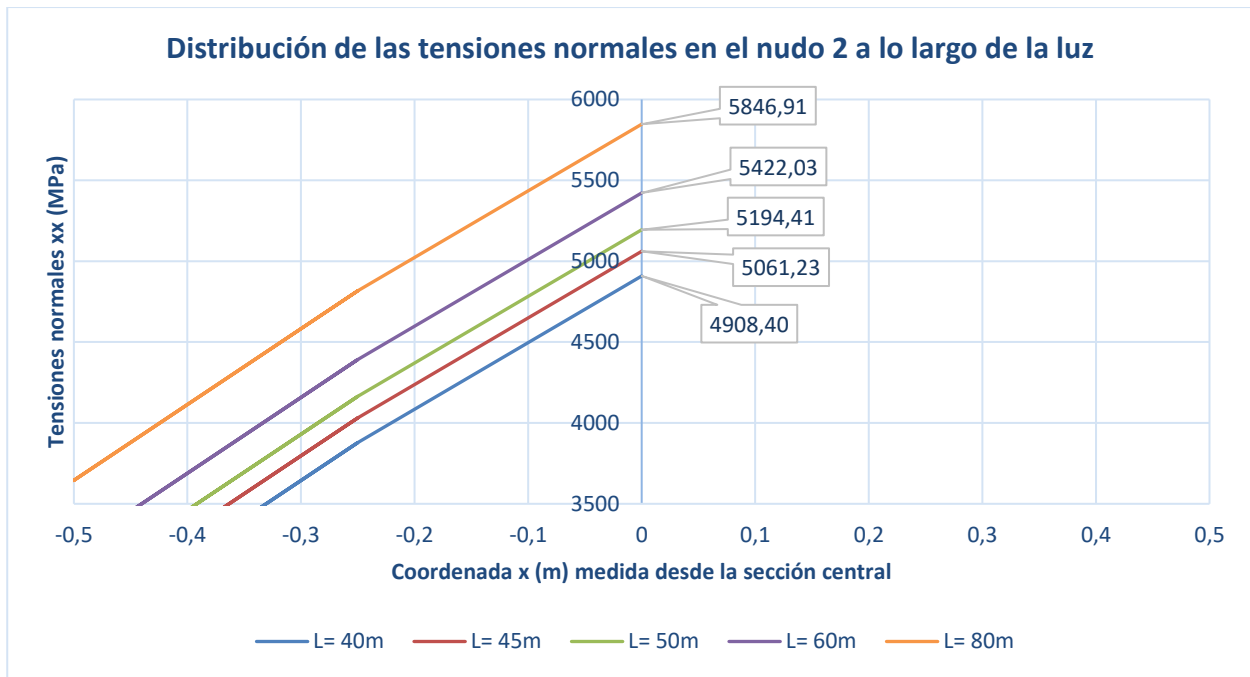


Figura 49: Distribución de las tensiones normales en el nudo 2 a lo largo de la luz (modelos del caso 1)

Además, se ha aumentado la gráfica en la zona del centro, para poder ver el valor máximo que se alcanza en cada uno de los modelos.



Como se puede apreciar, la distribución de las tensiones normales a lo largo del nudo 2 es análoga a la del estudio de D. Javier Manterola. Como cabía esperar, en todos los casos las tensiones son de compresión y alcanzan su valor máximo en la sección central. A medida que se aumenta la luz del puente, la tensión en el nudo 2 de la sección central aumenta.

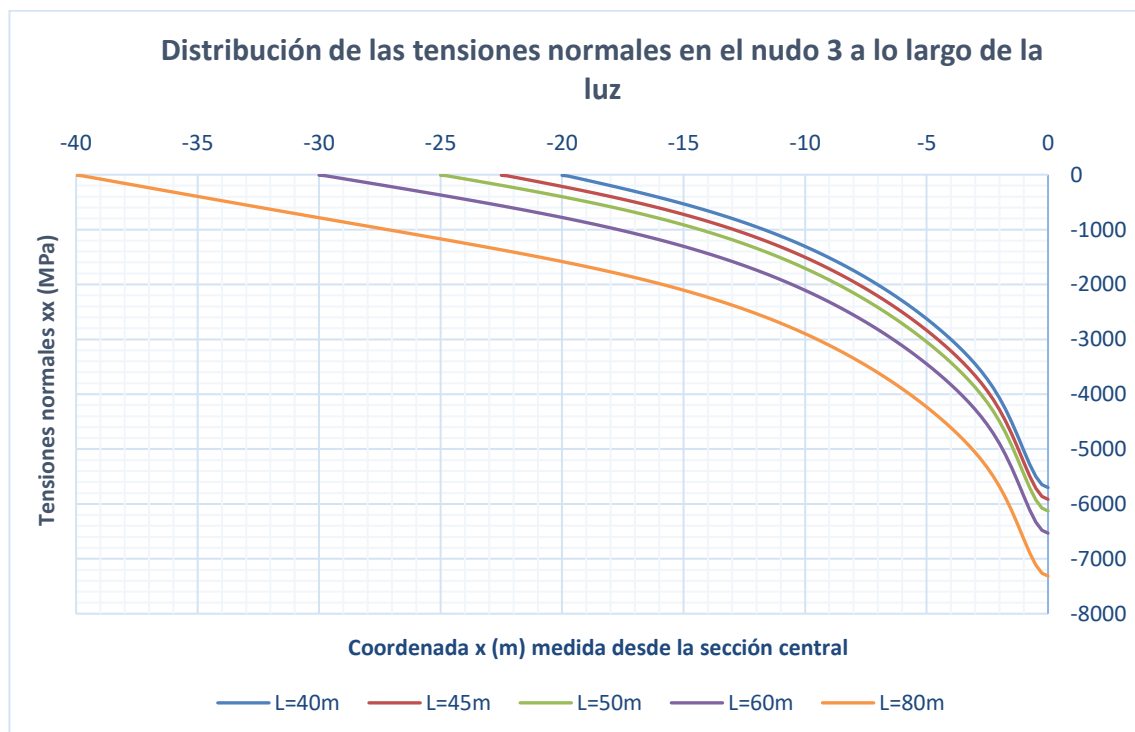


Figura 50: Distribución de las tensiones normales en el nudo 3 a lo largo de la luz (modelos del caso 1)

La tensión en el nudo 3 en todos los modelos es de tracción, como ocurre en el modelo de referencia, cuyo máximo se encuentra siempre en la sección central y aumenta con la luz.

Lo mismo ocurre con las tensiones en el nudo 5, sólo que éstas son de compresión.

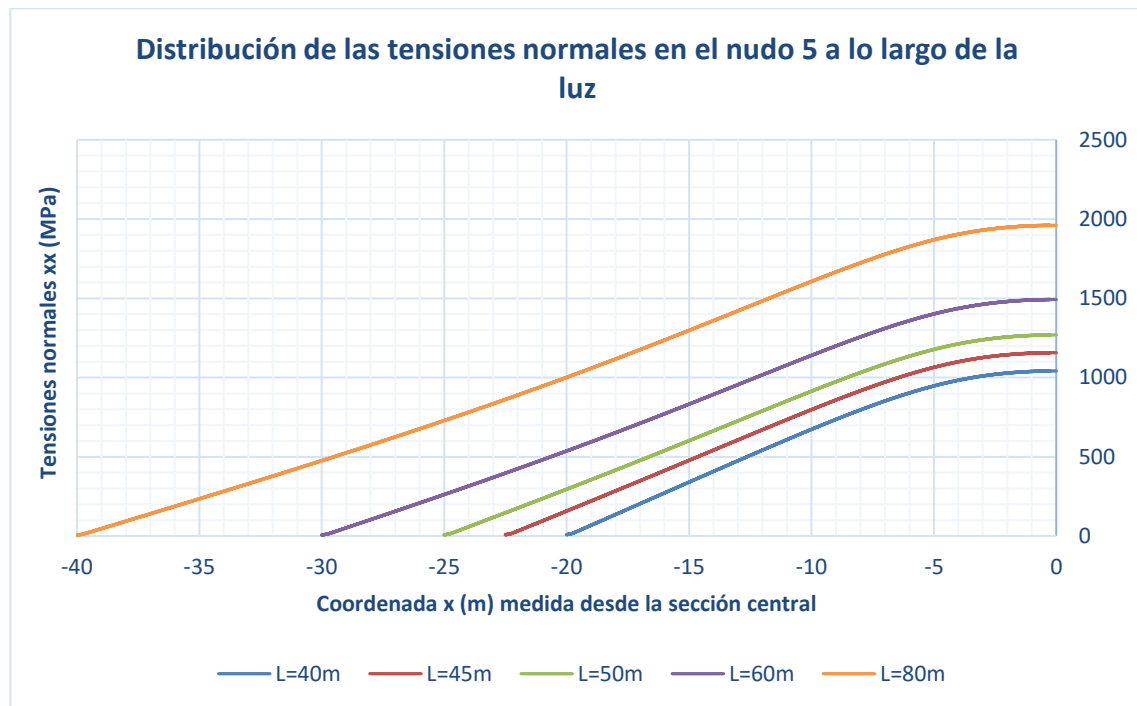


Figura 51: Distribución de las tensiones normales en el nudo 5 a lo largo de la luz (modelos del caso 1)

Por último, se ve en la figura 52, las tensiones en el nudo 6 son todas de tracción. En este caso, la tensión máxima no se da en la sección central, sino que se encuentra en una sección entre el apoyo y el centro del puente.

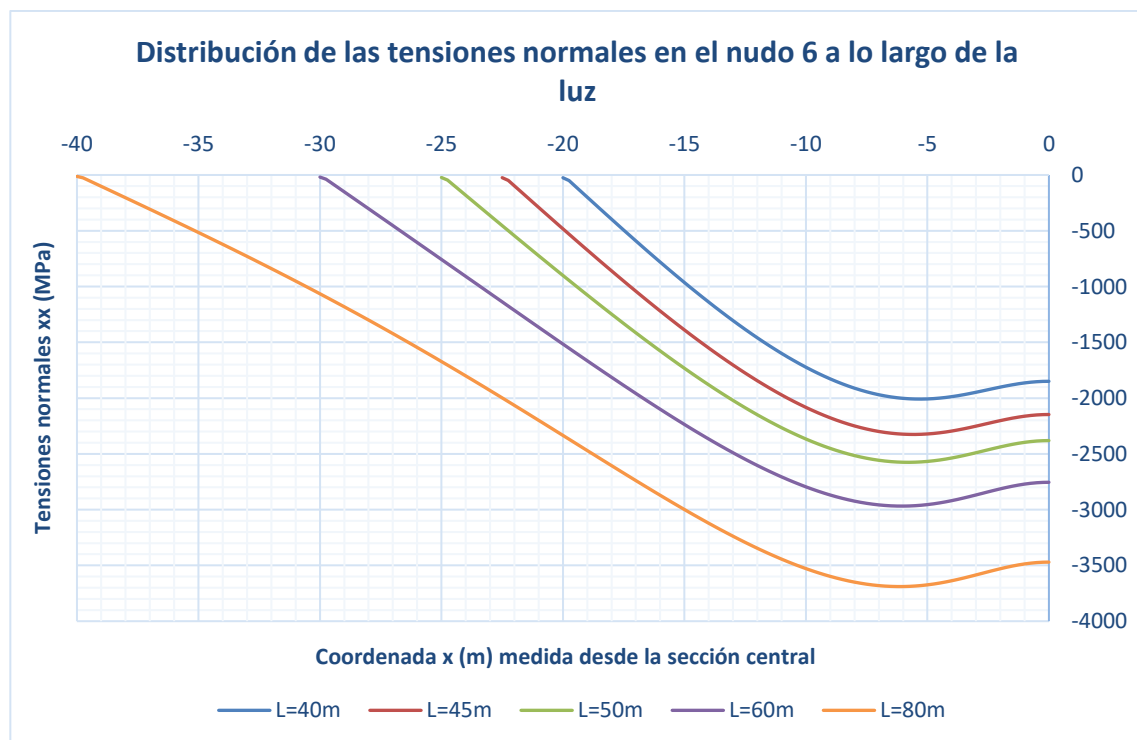


Figura 52: Distribución de las tensiones normales en el nudo 6 a lo largo de la luz (modelos del caso 1)

En la siguiente gráfica se muestra lo que se ha comentado en relación a las anteriores gráficas: el aumento de la luz del puente supone un incremento de las tensiones normales, siendo éstas de compresión en los nudos 2 y 5, y de tracción en los nudos 3 y 6.

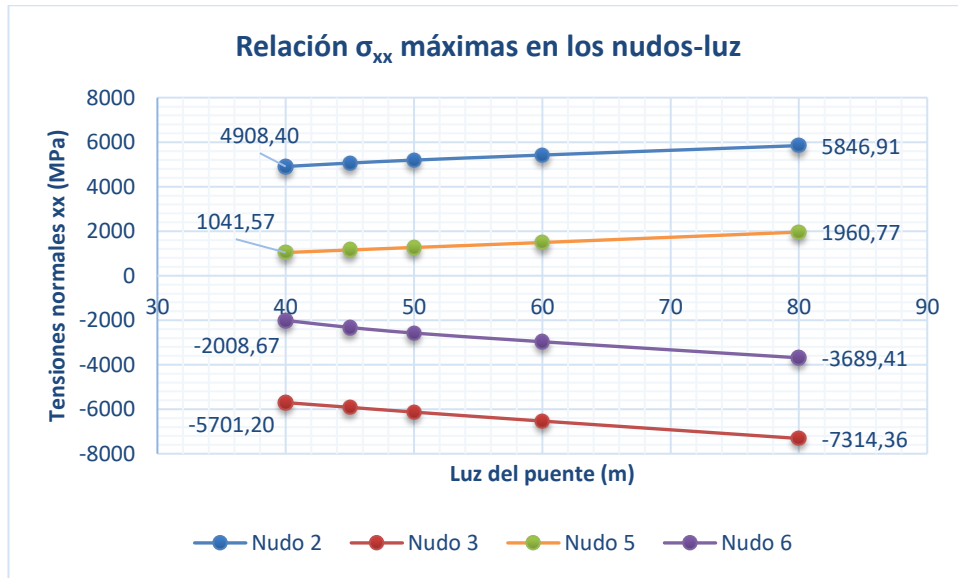


Figura 53: Relación σ_{xx} máximas en los nudos-luz del puente

A continuación, se muestran las tensiones normales para las secciones que se encuentran en el centro del puente y a un octavo de la luz (medido desde el centro). No se han representado de todos los modelos ya que, como se ha visto en las gráficas anteriores, el aumento de la luz no supone un cambio en la distribución de las tensiones normales (aunque sí de los valores). Por ello, se han escogido los modelos de 45 y 80 metros de luz, que son los modelos extremos del caso 1.

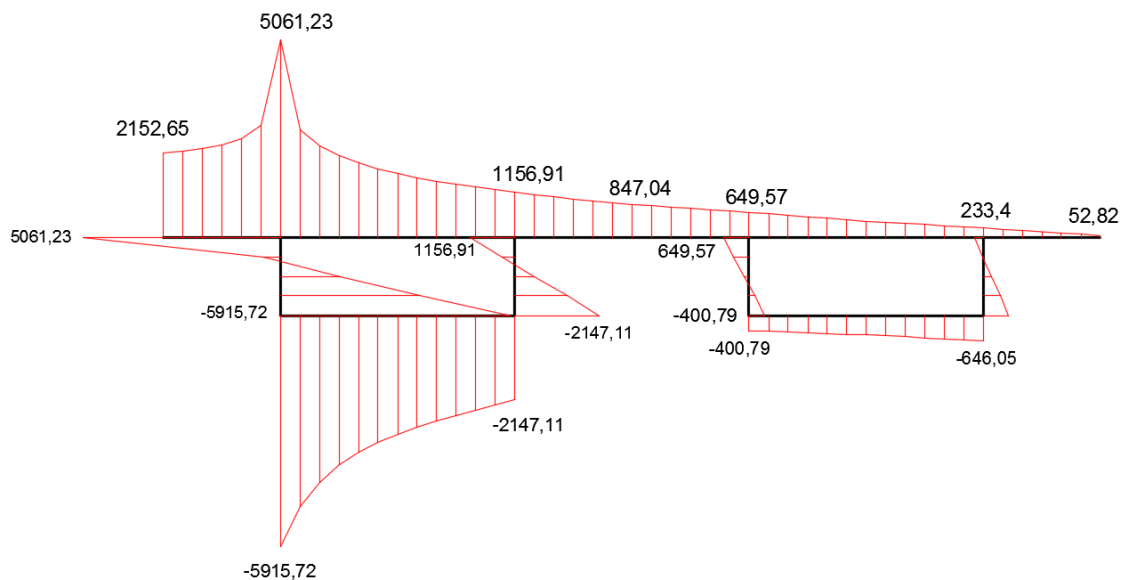


Figura 54: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=22.5$ m, del modelo de 45 metros de luz

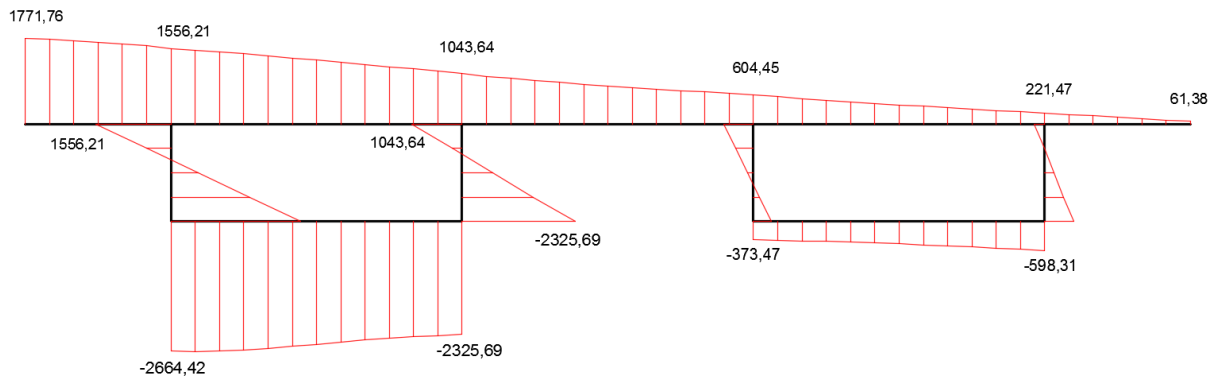


Figura 55: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=17$ m, del modelo de 45 metros de luz

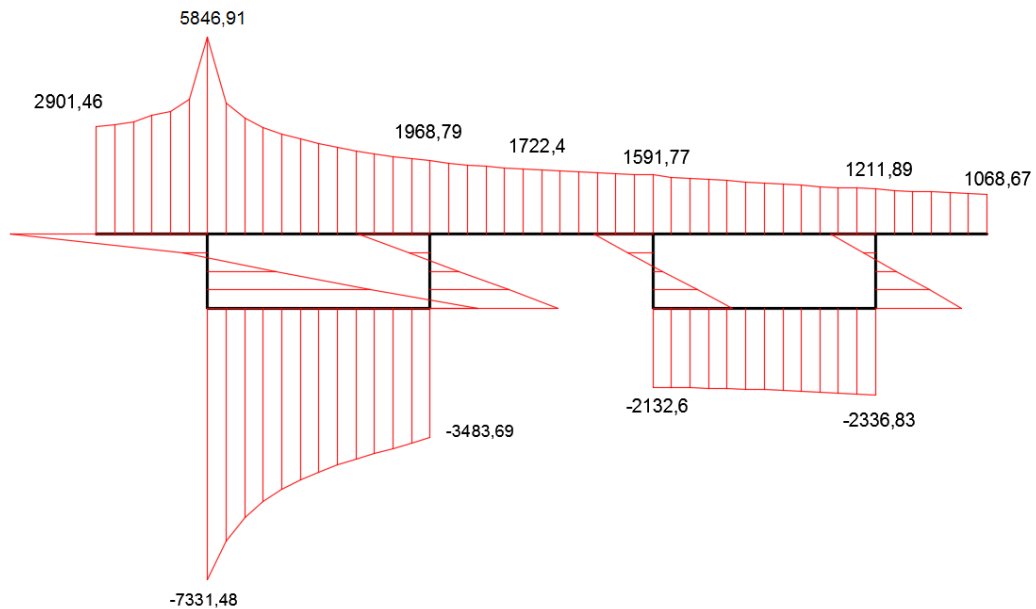


Figura 56: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=40$ m, del modelo de 80 metros de luz

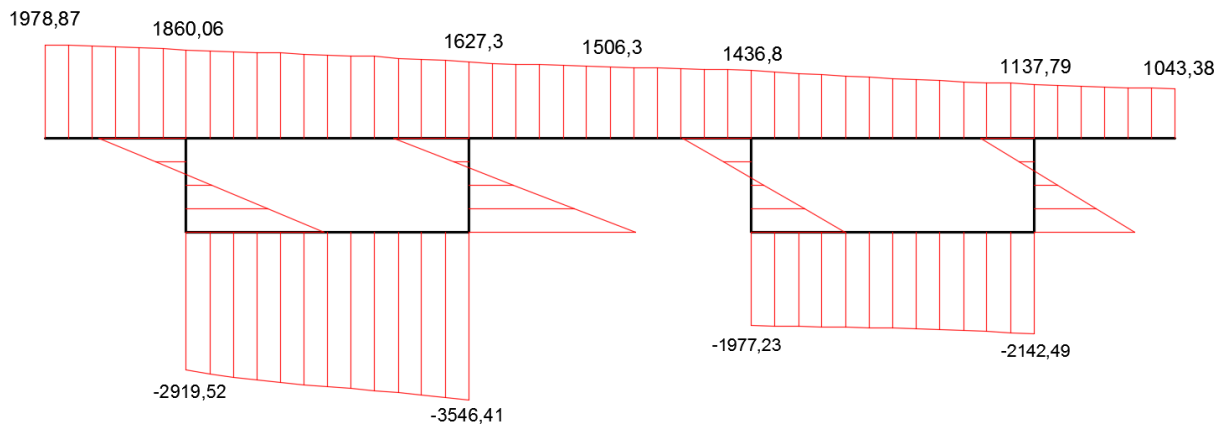
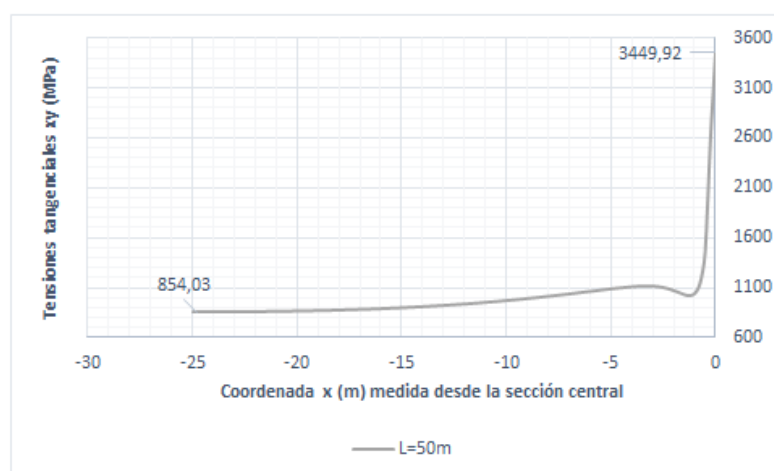
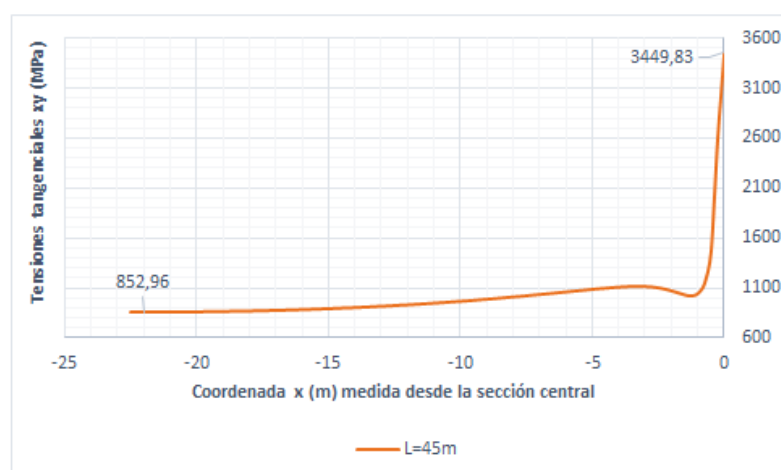
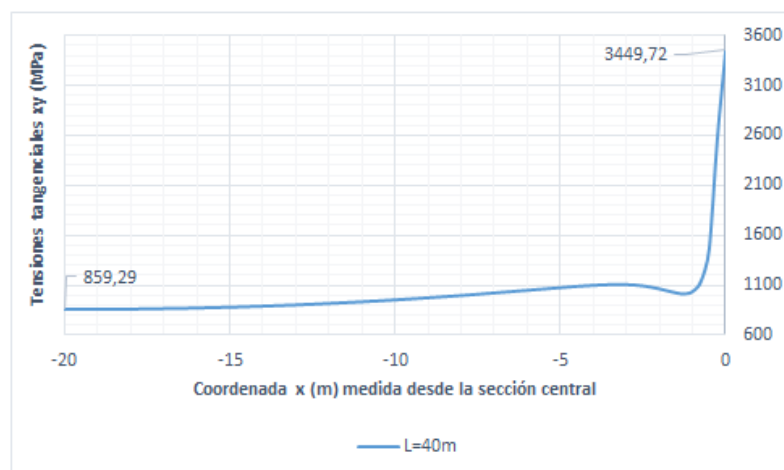


Figura 57: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=30$ m, del modelo de 80 metros de luz

4.1.2.4.2 Tensiones tangenciales

Para la representación de las tensiones tangenciales, se han escogido los mismos casos que para representar las tensiones normales (los modelos de luces 45, 50, 60 y 80 metros). Como se puede ver en las siguientes gráficas, la carga puntual provoca una perturbación en sus proximidades, atenuándose rápidamente y llegando a un valor pseudoconstante al acercarse a los apoyos.

Distribución de las tensiones tangenciales en el nudo 2 a lo largo de la luz



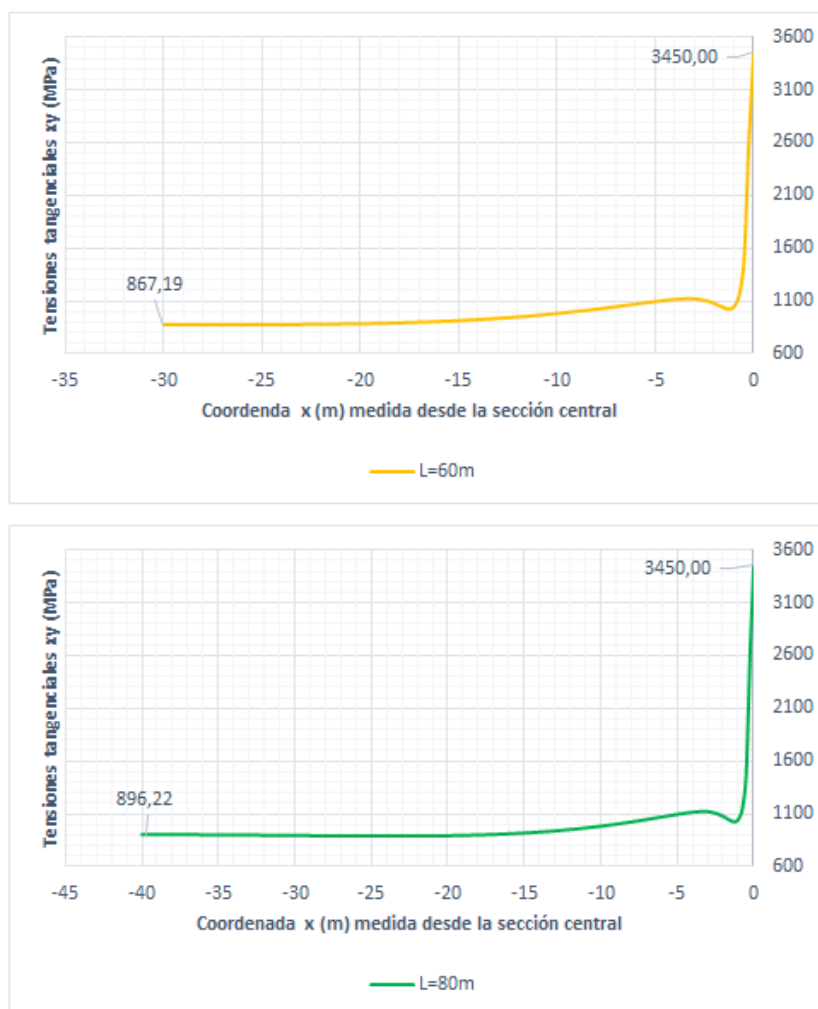
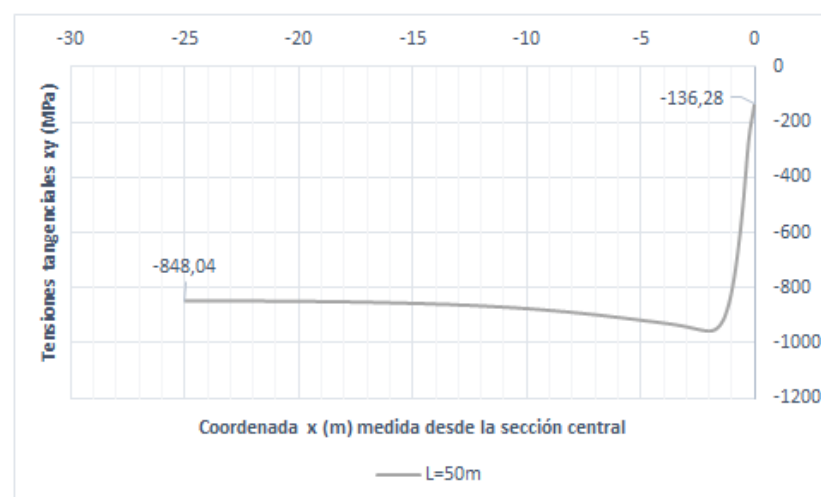
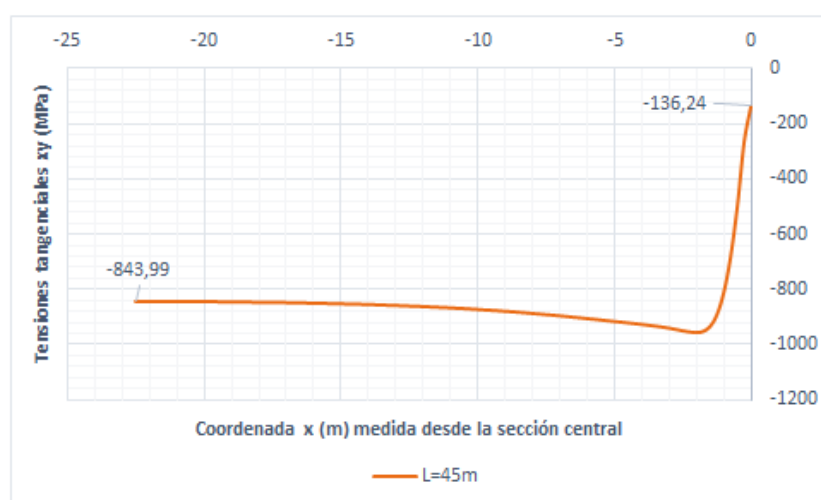
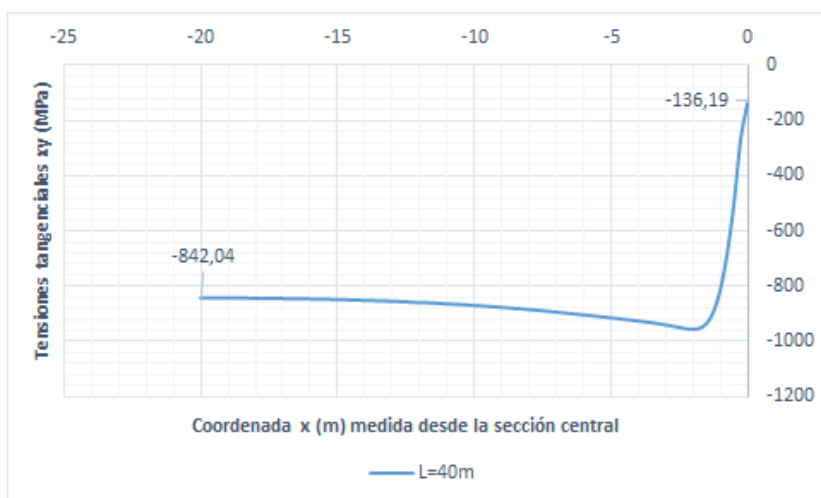


Figura 58: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 2, a lo largo de la luz, para los modelos de 40, 45, 50, 60 y 80 metros de luz

Además, como se puede ver en cada una de las gráficas para cada modelo, la diferencia entre los valores de las tensiones tangenciales es casi inexistente. Por esta razón se han representado en diferentes gráficas, ya que, si no, no se podrían diferenciar unas de otras.

Distribución de las tensiones tangenciales en el nudo 3 a lo largo de la luz

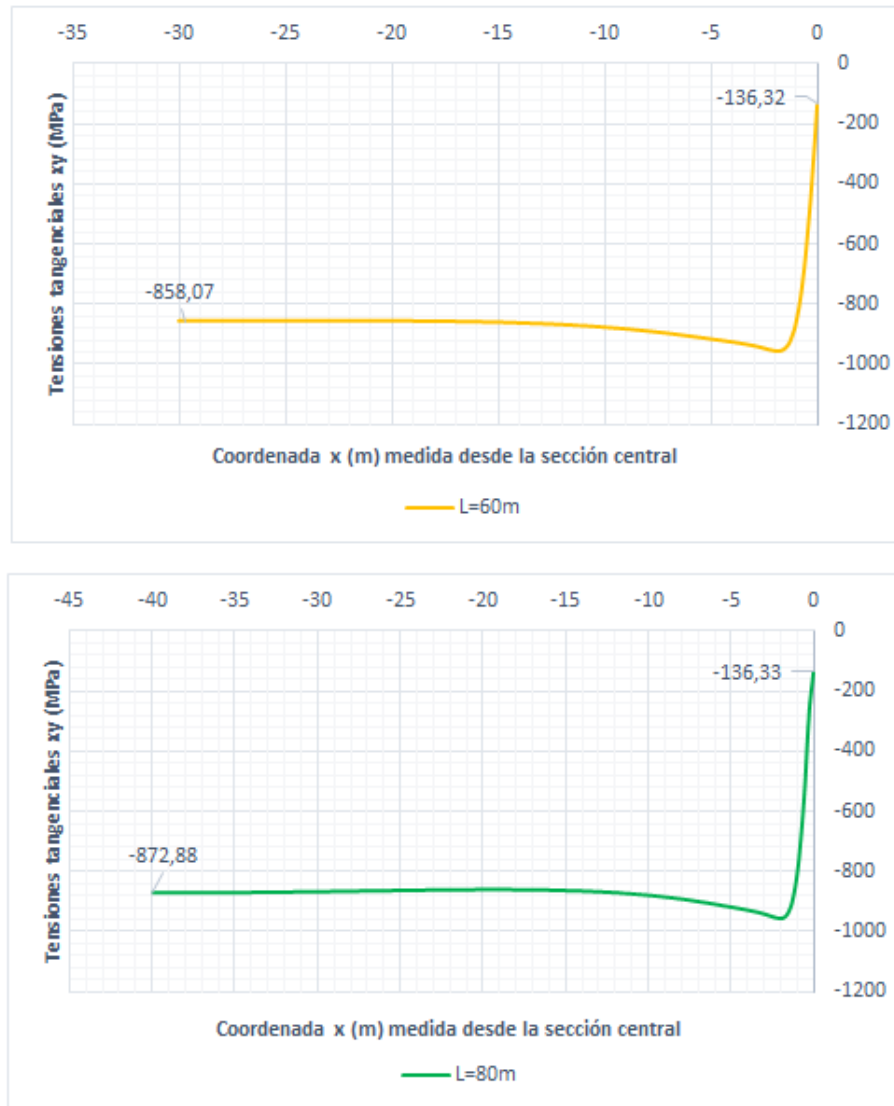


Figura 59: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 3, a lo largo de la luz, para los modelos de 40, 45, 50, 60 y 80 metros de luz

Al igual que ocurre en el nudo 2, las tensiones tangenciales en el nudo 3 son prácticamente iguales en todos los modelos estudiados. En todos, las tensiones tienen signo negativo, y alcanzan su valor máximo (negativo) en la sección del apoyo. Al alejarnos de ésta, mantienen un valor aproximadamente constante hasta que, en la zona cercana a la sección central, disminuyen hasta alcanzar su mínimo (negativo) en ésta.

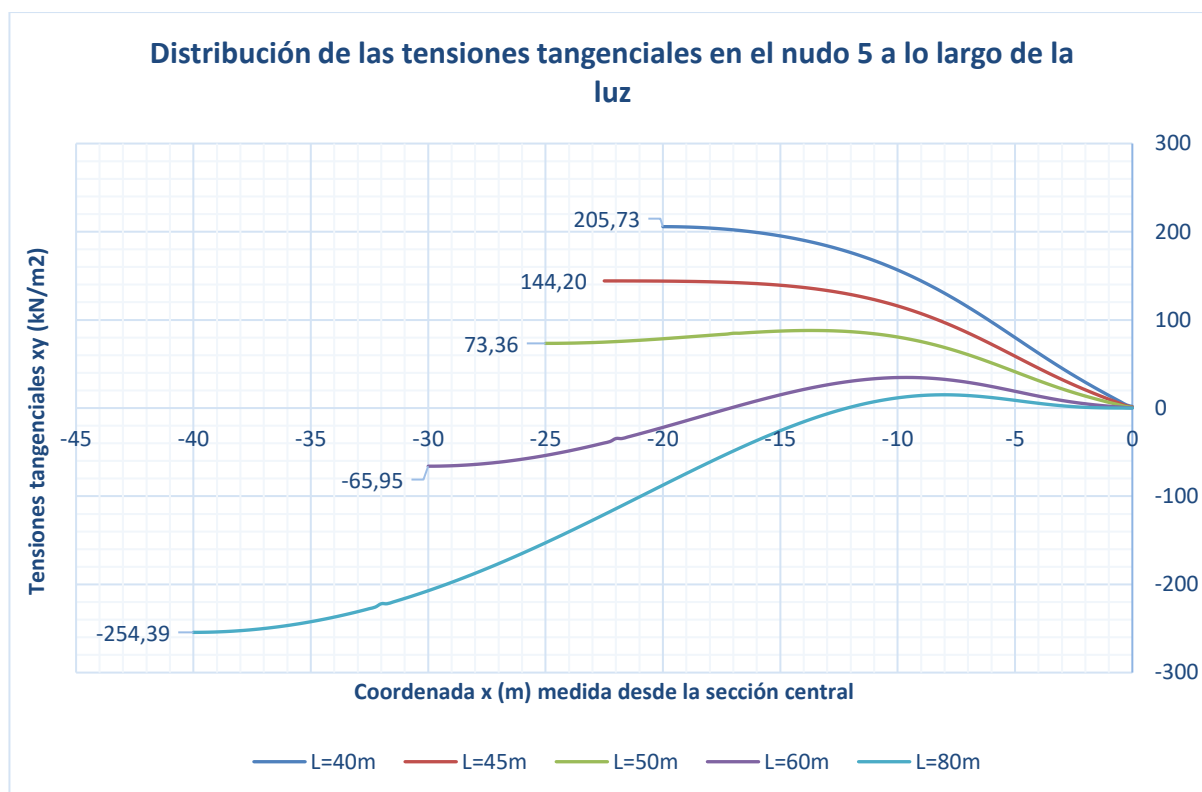


Figura 60: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 5, a lo largo de la luz, para los modelos de 40, 45, 50, 60 y 80 metros de luz

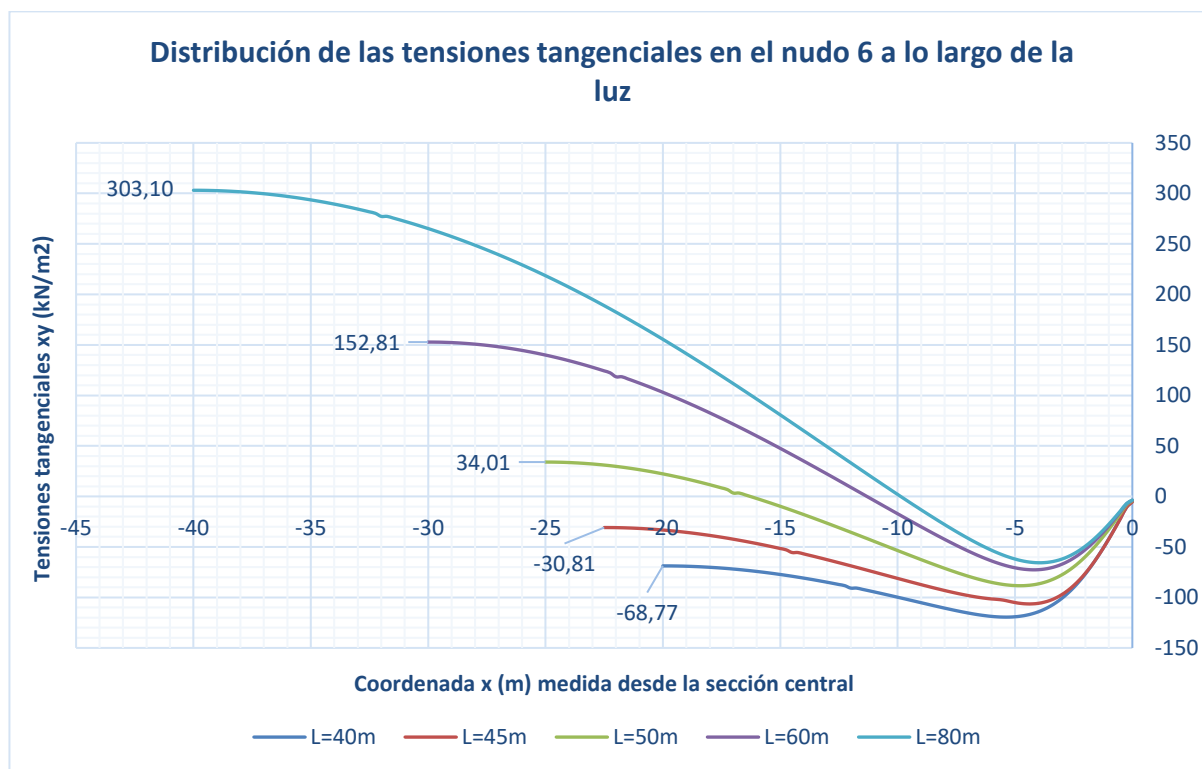


Figura 61: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 6, a lo largo de la luz, para los modelos de 40, 45, 50, 60 y 80 metros de luz

Tanto las tensiones tangenciales τ_{xy} en el nudo 5 (figura 60) como las tensiones tangenciales τ_{xy} en el nudo 6 (figura 61) sí difieren entre los modelos.

Como se puede apreciar, en la figura 61, en el modelo de 40 metros de luz la tensión en el extremo del vano es negativa, al igual que en el modelo de 45 metros de luz. Sin embargo, en el siguiente caso ($L=50\text{m}$), dicha tensión tiene signo positivo, y esto se mantiene en los casos que le siguen: luces de 50, 60 y 80 metros.

Algo parecido sucede con las tensiones tangenciales en el nudo 5: mientras que para 40 metros de luz las tensiones no cambian de signo hasta llegar a la sección central, a partir del modelo con una luz igual a 50 metros, las tensiones tangenciales τ_{xy} sufren una alteración en su signo antes de llegar al centro del puente.

En la siguiente gráfica (figura 62) se muestra la relación existente entre los valores máximos de las tensiones tangenciales en los nudos estudiados y la luz del puente. Como muestra la gráfica, la variación de las tensiones tangenciales en los nudos 2 y 3 (pertenecientes al alma cargada) es mínima. En relación a las tensiones en los nudos 5 y 6, en ambos se produce un cambio de signo para una luz de, aproximadamente, 55 metros.

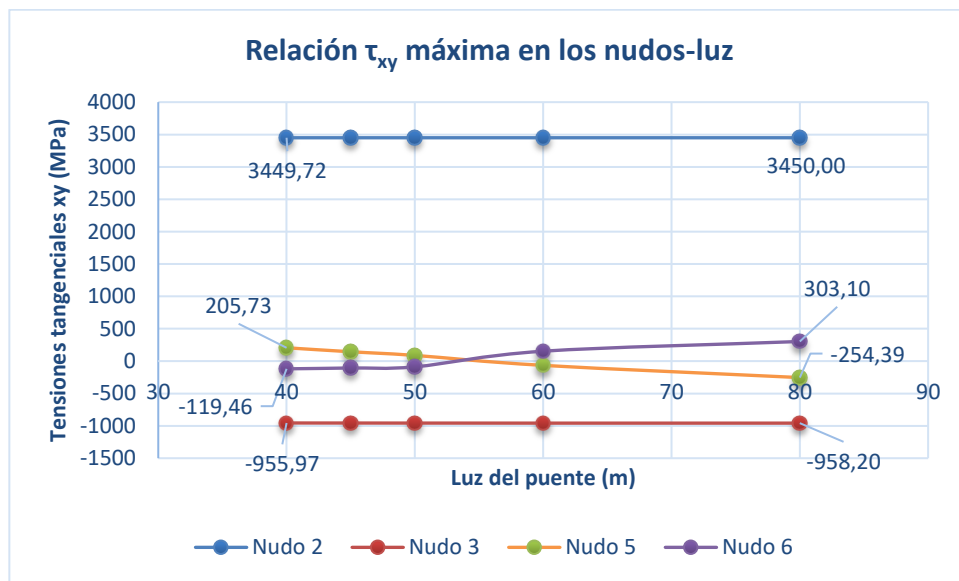


Figura 62: Relación τ_{xy} máxima en los nudos-luz

Para finalizar el estudio del caso de variación de la luz, se exponen en las siguientes imágenes las tensiones tangenciales de las secciones del apoyo y de la sección que se encuentra a un cuarto de la luz del extremo, para los modelos de 45 y 80 metros de luz. En este caso, no se ha escogido la sección que se encuentra a 0.5 metros del centro (como en el estudio de D. Javier Manterola) ya que, como se ha visto en las gráficas anteriores, la distribución de tensiones en dicha sección no varía significativamente con el cambio de luz.

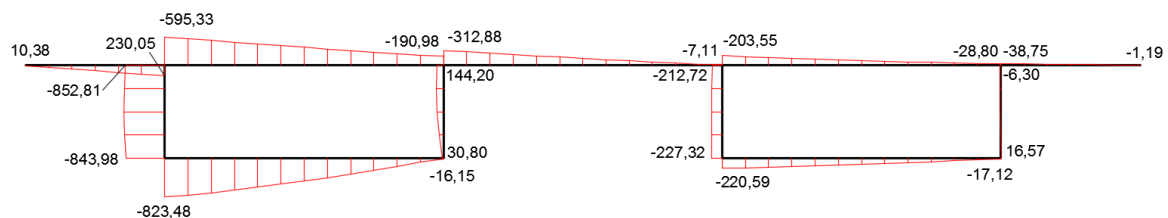


Figura 63: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=0\text{ m}$, del modelo de 45 metros de luz

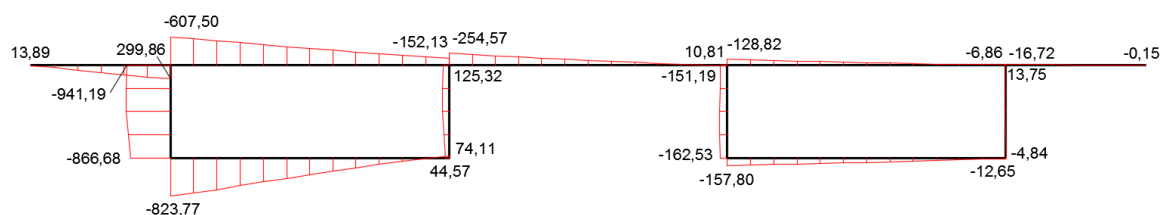


Figura 64: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=11.25$ m, del modelo de 45 metros de luz

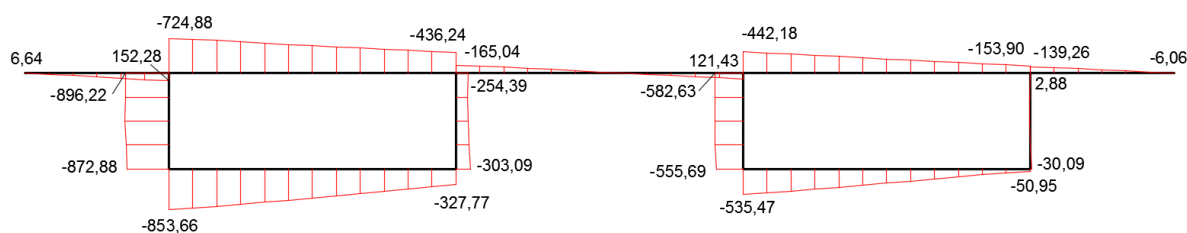


Figura 65: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=0$ m, del modelo de 80 metros de luz

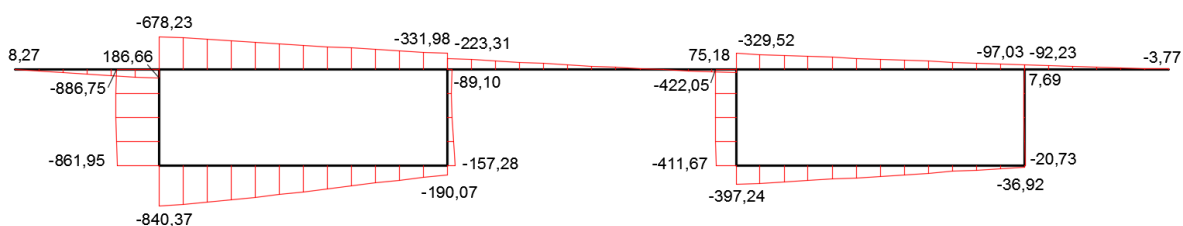


Figura 66: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=20$ m, del modelo de 80 metros de luz

4.2 Caso 2: Variación de la inclinación de las almas

4.2.1 Descripción del modelo

Como se puede ver en la figura 02, los modelos de este caso varían en la inclinación de las almas, que van desde los 40° hasta los 90° (siendo éste último el modelo del estudio de D. Javier Manterola).

Se procederá a analizar cómo influye la modificación de éste parámetro geométrico en la respuesta resistente del puente.

4.2.2 Resultados obtenidos en el caso 2

4.2.2.1 Desplazamientos

Al igual que sucede en el caso 1, la distribución de los desplazamientos es similar a los desplazamientos del modelo de D. Javier Manterola. Por ello, a continuación, sólo se mostrarán los desplazamientos correspondientes a cuatro de los modelos de este caso, que son: almas inclinadas 40° , 50° , 70° y 80° .

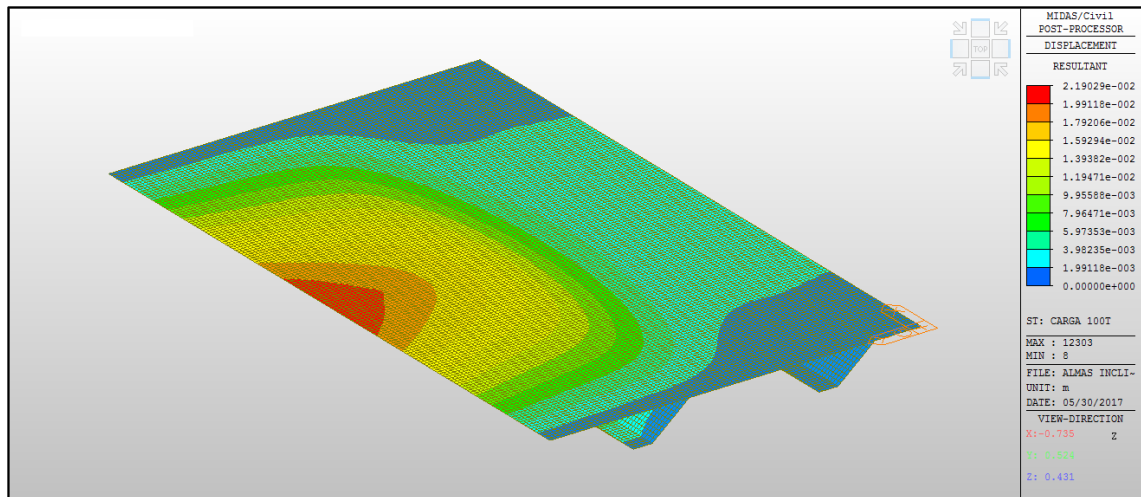


Figura 67: Desplazamientos (m) del modelo con las almas inclinadas 40°

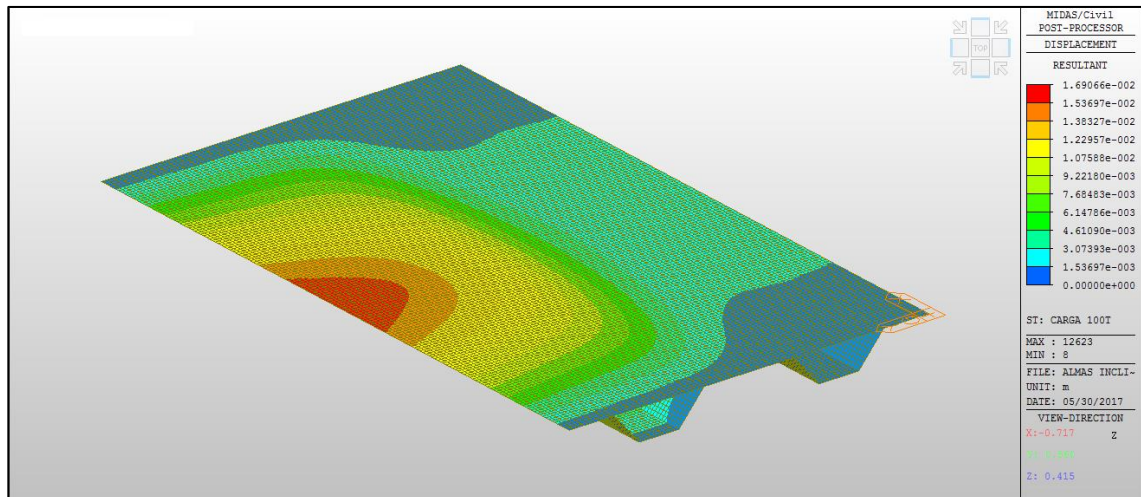


Figura 68: Desplazamientos (m) del modelo con las almas inclinadas 50°

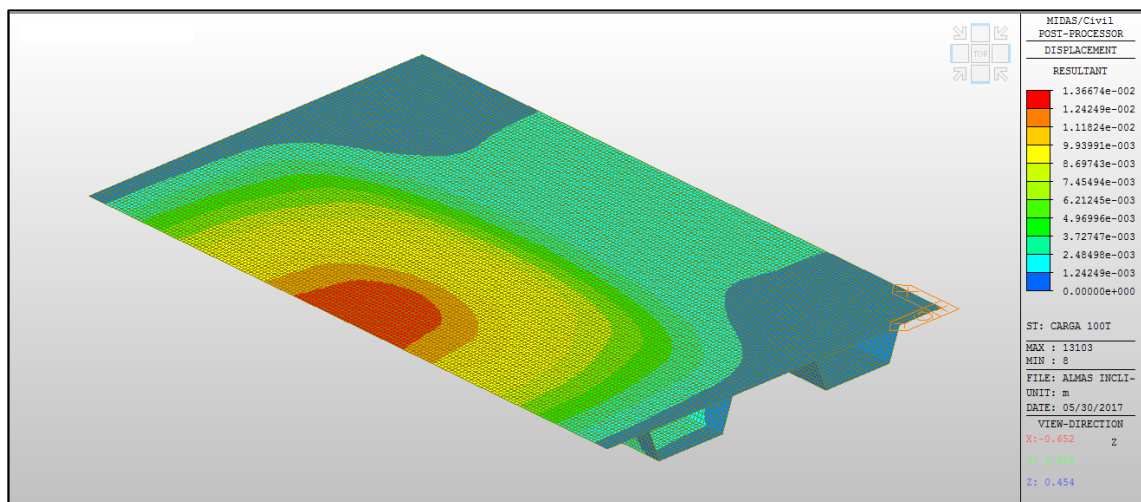


Figura 69: Desplazamientos (m) del modelo con las almas inclinadas 70°

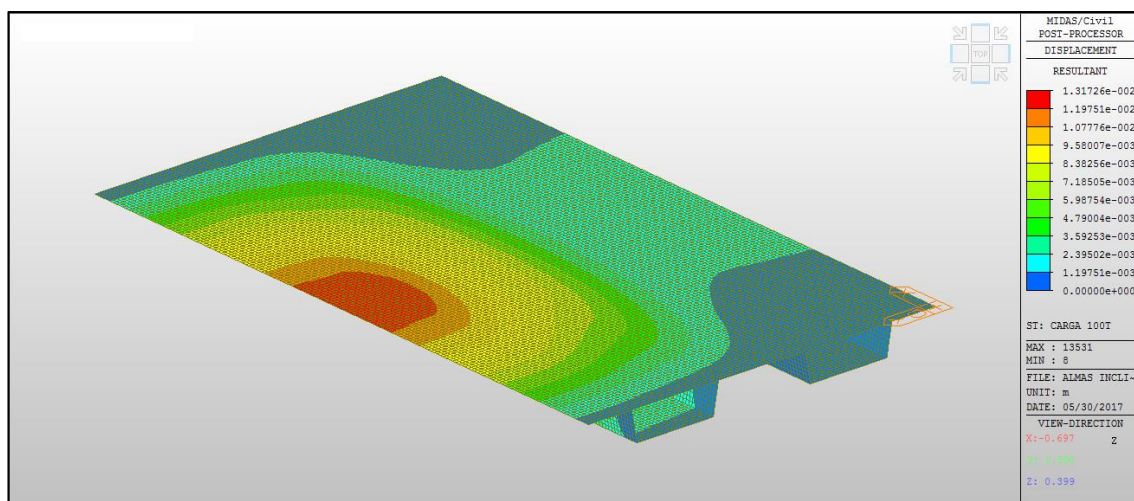


Figura 70: Desplazamientos (m) del modelo con las almas inclinadas 80°

Con las figuras 67, 68, 69 y 70 se puede ver la variación de los desplazamientos que sufre el puente en las inmediaciones de la carga. Para una inclinación de las almas de 40° se aprecia una distribución de los desplazamientos en forma de V y, a medida que se aumenta la inclinación, esta forma evoluciona hasta adoptar forma de U, aumentando el valor de los desplazamientos de la losa superior sobre el alma cargada. Además, como se verá en el apartado de tensiones normales de este caso, este efecto tendrá una consecuencia en la distribución de las tensiones normales en el nudo 1, fenómeno que no se observa en el estudio de D. Javier Manterola ni en el resto de casos del presente estudio.

En las siguientes gráficas se representan los desplazamientos verticales de las cuatro esquinas de ambos cajones (de la sección central) cuando se varía la inclinación de las almas.

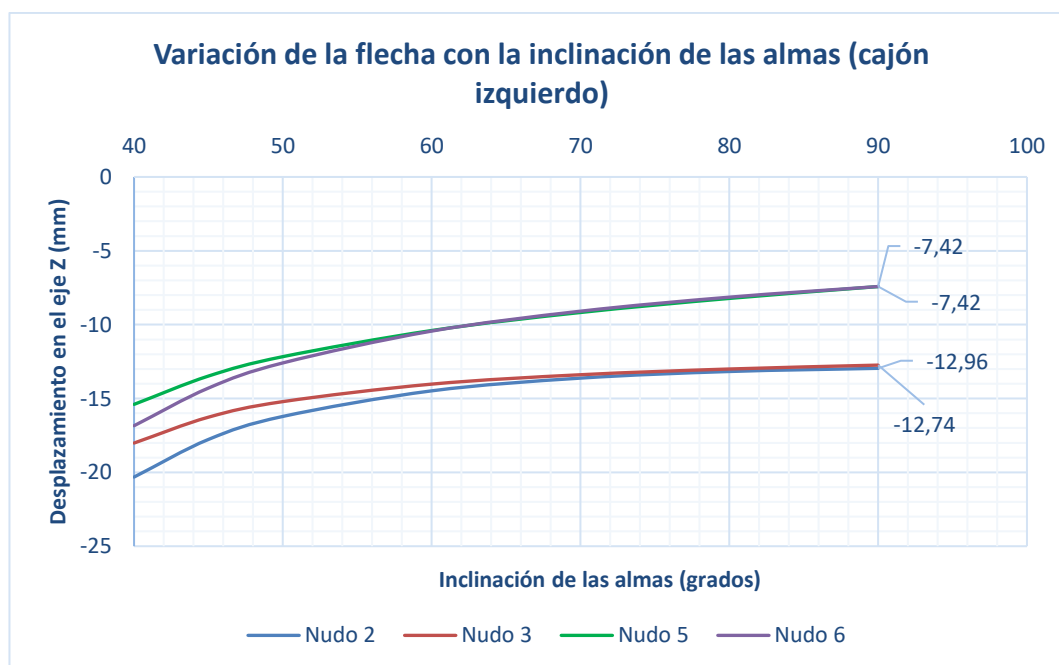


Figura 71: Desplazamientos verticales del cajón izquierdo al variar la inclinación de las almas

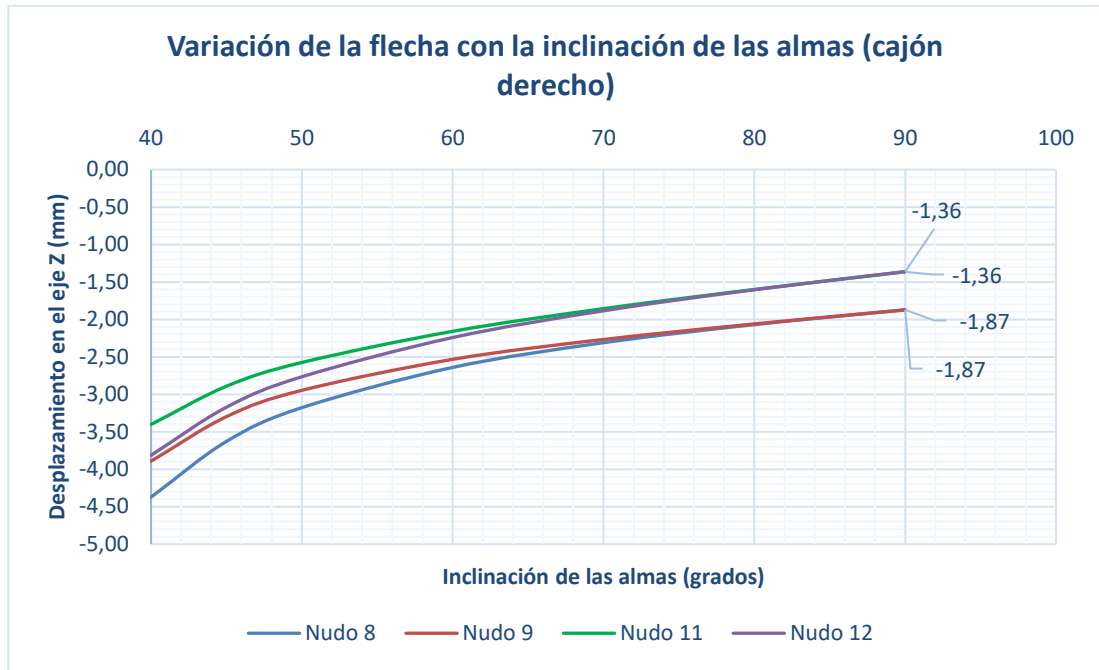


Figura 72: Desplazamientos verticales del cajón derecho al variar la inclinación de las almas

Como ocurre en el caso 1, la flecha del cajón cargado directamente (izquierdo) es mayor que la del cajón no cargado (derecho).

Como se puede ver en ambas gráficas, las flechas de los extremos de un alma se asemejan más cuanto mayor es la inclinación. Es decir, para una inclinación de 40°, los extremos de una misma alma tienen desplazamientos verticales distintos. En cambio, conforme la inclinación se acerca a los 90°, esta diferencia casi desaparece.

Para concluir, se ha representado en una gráfica la relación entre el valor de la flecha máxima y la inclinación de las almas. Como se observa en la figura 73, el aumento de la inclinación de las almas supone una disminución de la flecha, hasta un valor de 65°. A partir de este punto, la flecha sigue disminuyendo, pero de forma más suave, pudiendo aproximar la evolución de la flecha máxima con una ecuación de segundo grado.

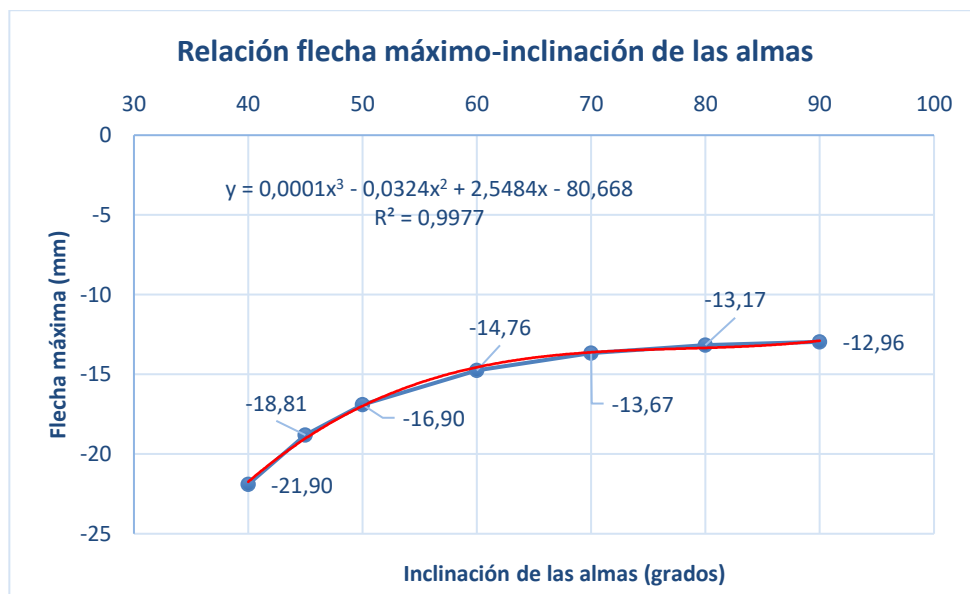


Figura 73: Relación flecha máxima-inclinación de las almas

4.2.2.2 Distorsión

En la siguiente gráfica (figura 74) se puede ver el valor de la distorsión para la sección central en cada uno de los modelos que se ha estudiado.

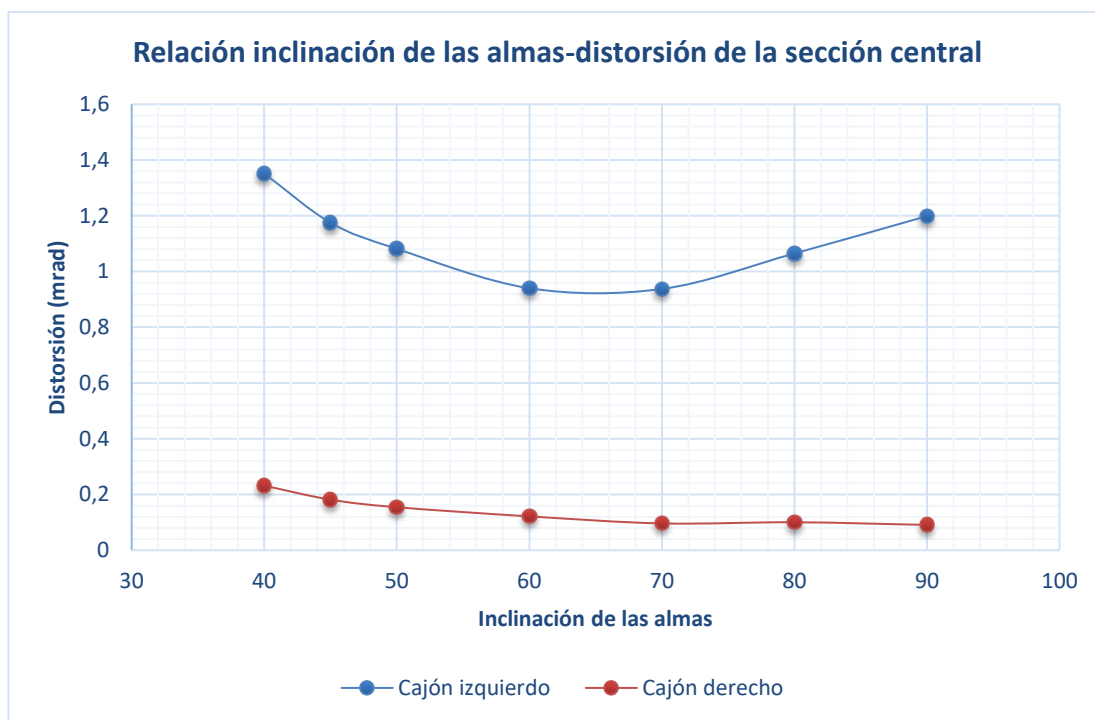


Figura 74: Relación inclinación de las almas-distorsión de la sección central

La distorsión del cajón derecho, como se aprecia en la gráfica anterior, decrece a medida que la inclinación de las almas aumenta. En cambio, la distorsión del cajón izquierdo, decrece hasta un valor de la inclinación de las almas de unos 60° aproximadamente. En ese punto, la función presenta un mínimo, a partir del cual, crece hasta el final.

Estos mismos resultados son los que Sergio Cobo obtuvo en su trabajo de fin de grado ‘Análisis de sensibilidad a la inclinación de las almas en las secciones tipo cajón en puentes’^[3], y se ha llegado a la misma conclusión a la que él llegó (aunque en su estudio, la sección transversal estaba formada por un solo cajón): para minimizar la distorsión del cajón cargado, las almas deberían inclinarse entre los 60° y 70°.

4.2.2.3 Esfuerzos

A continuación, se muestran las gráficas de cómo evolucionan los esfuerzos cuando se varía la inclinación de las almas. Se han representado los esfuerzos de todos los modelos que se han estudiado ya que, a diferencia de lo que ocurría en el caso 1 (variación de la luz del puente), hay algunos modelos cuya distribución de esfuerzos se diferencian claramente del resto, como se verá en las gráficas.

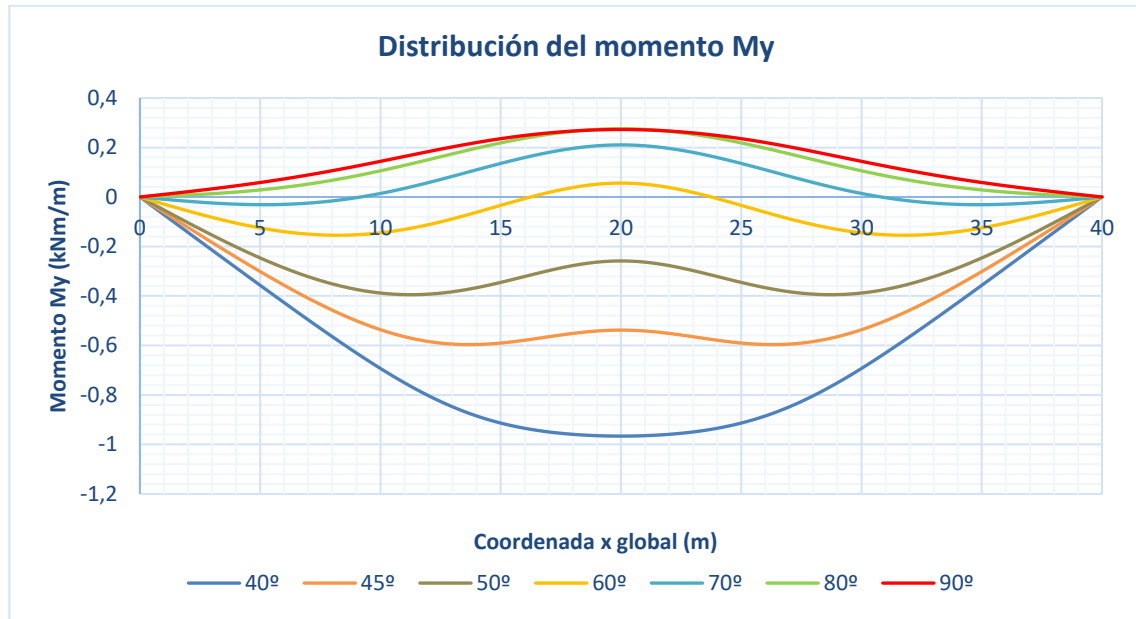


Figura 75: Distribución del momento M_y para los modelos con 40°, 45°, 50°, 60°, 70°, 80° y 90° de inclinación de las almas

Los momentos flectores, como se puede ver en la figura 75, disminuyen al aumentar la inclinación de las almas. Para inclinaciones desde 90° hasta 80°, la distribución de momentos flectores M_y es bastante parecida. A partir de dicho valor, las diferencias son cada vez mayores, hasta tal punto que los momentos flectores son negativos en toda la luz del puente (inclinaciones entre 55° y 40°), cuando en los casos anteriores eran positivos.

Sin embargo, como se puede ver en la gráfica anterior, el máximo valor del momento M_y se obtiene en el modelo en el que las almas están inclinadas 40°, y, aun así, no alcanza a valer 1 kNm/m . Es decir, en todos los modelos sigue siendo el esfuerzo de menor cuantía.

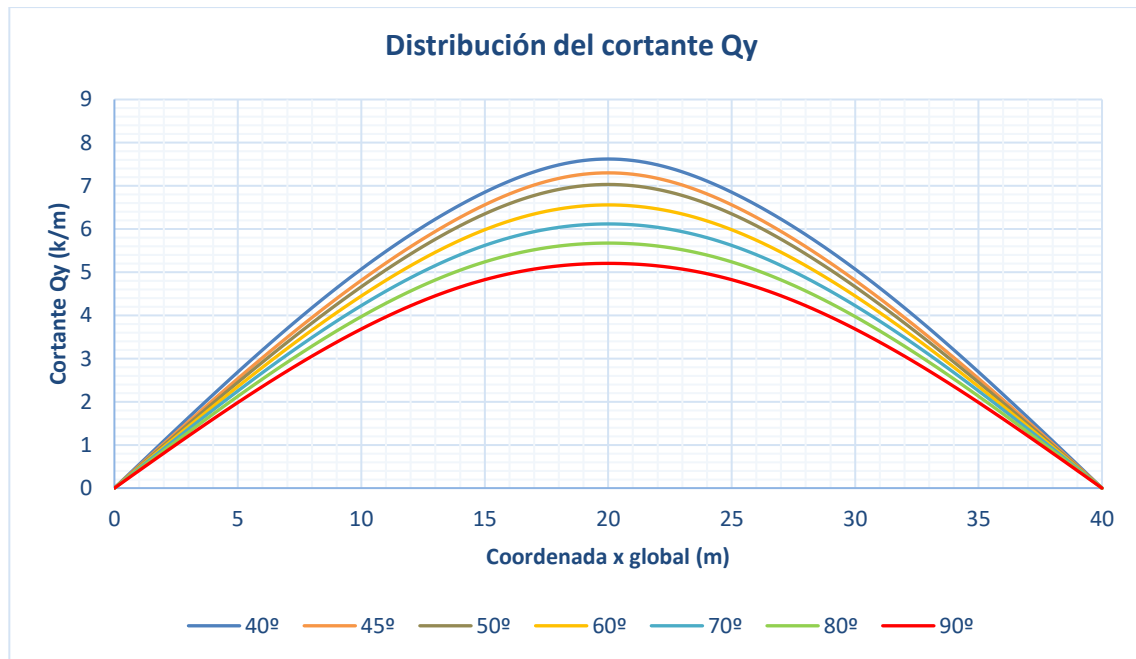


Figura 76: Distribución del cortante Q_y para los modelos con 40°, 45°, 50°, 60°, 70°, 80° y 90° de inclinación de las almas

En cuanto al esfuerzo cortante Q_y (figura 77), la distribución es la misma en todos los casos: en el centro de la luz se encuentra el valor máximo, mientras que en los extremos se da el valor mínimo (nulo), siendo de signo positivo en toda la longitud del puente.

Se muestra a continuación la gráfica que recoge la evolución del esfuerzo cortante Q_y máximo al aumentar la inclinación de las almas, desde los 40 hasta los 90 grados. Al igual que se ha comentado anteriormente, este valor máximo disminuye conforme se incrementa la inclinación de las almas.

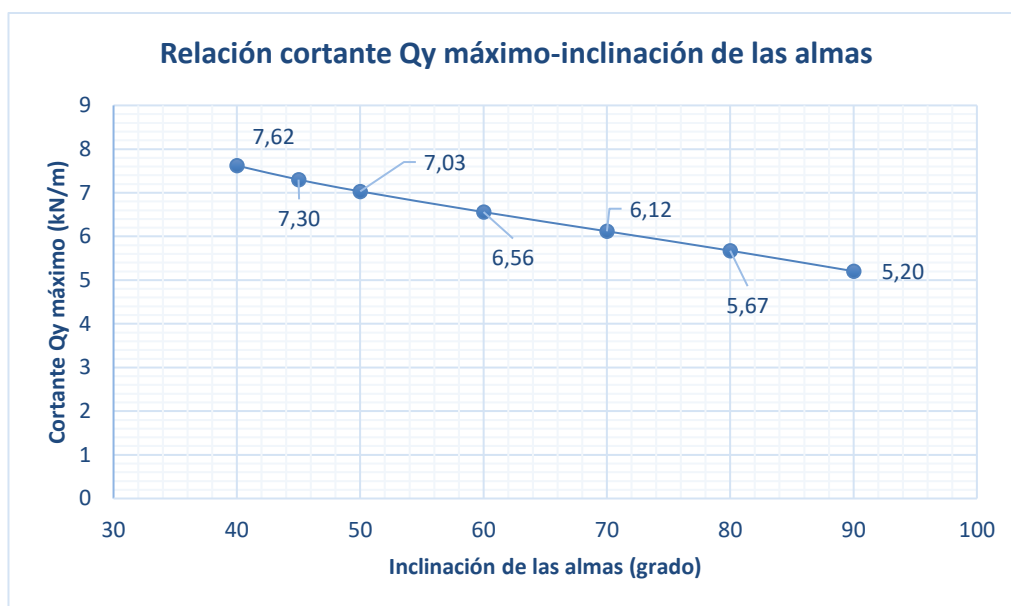


Figura 77: Relación cortante Q_y máximo-inclinación de las almas

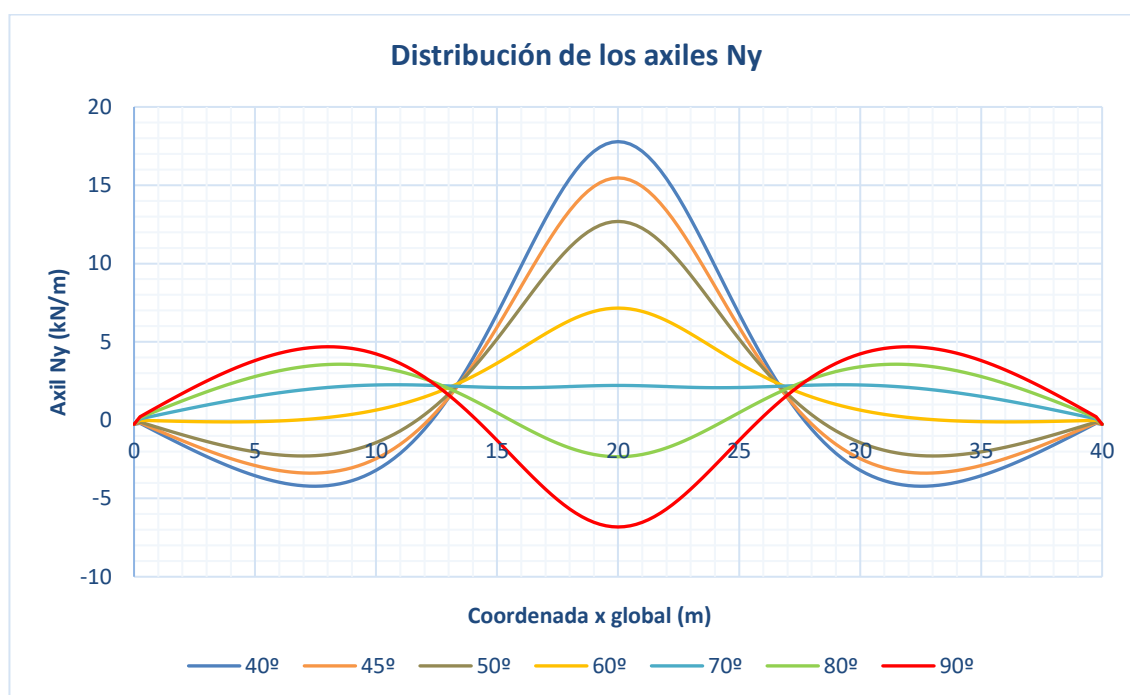


Figura 78: Distribución del axil N_y para los modelos con 40°, 45°, 50°, 60°, 70°, 80° y 90° de inclinación de las almas

Se aprecia una gran diferencia entre las gráficas del axil N_y al variar la inclinación de las almas, puesto que, como se puede observar, se produce un cambio de signo al disminuir dicho parámetro geométrico.

Es decir, para el modelo de D. Javier Manterola, el axil N_y tiene signo positivo desde el extremo hasta la sección que se encuentra a 14,25 metros de éste, a partir de la cual su signo pasa a ser negativo, y alcanza su máximo en el centro de la luz, siendo la distribución simétrica en la otra mitad del vano.

Los valores de N_y , al disminuir la inclinación de las almas, van disminuyendo en las secciones del extremo del

puente y aumentando en las secciones centrales, de tal forma que se llega a invertir el signo del esfuerzo. De hecho, para el modelo con una inclinación igual a 40° , el axil se mantiene positivo a lo largo de toda la luz del vano.

Del mismo modo que en el caso 1, en la siguiente gráfica se puede ver cómo varían los valores máximos (negativos y positivos) del axil transversal N_y al cambiar la inclinación de las almas. Para el valor máximo positivo, se ve la disminución que sufre al aumentar la inclinación desde los 40° hasta los 70° , punto a partir del cual comienza a crecer hasta los 90° , aunque de manera muy suave. De igual forma, se observa una evolución similar para el valor máximo negativo, aunque a partir de una inclinación igual a 70° , el crecimiento se produce con mayor pendiente. Además, cabe señalar que los valores máximos positivos son mayores que los negativos en todos los modelos estudiados, como se puede ver en la figura 79.

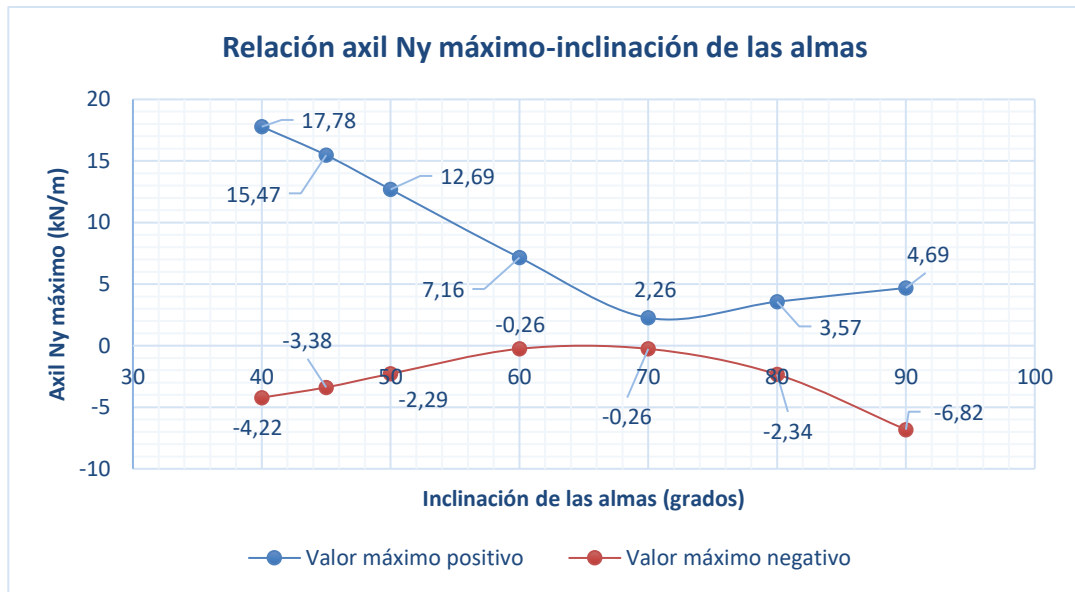


Figura 79: Relación axil N_y máximo-inclinación de las almas

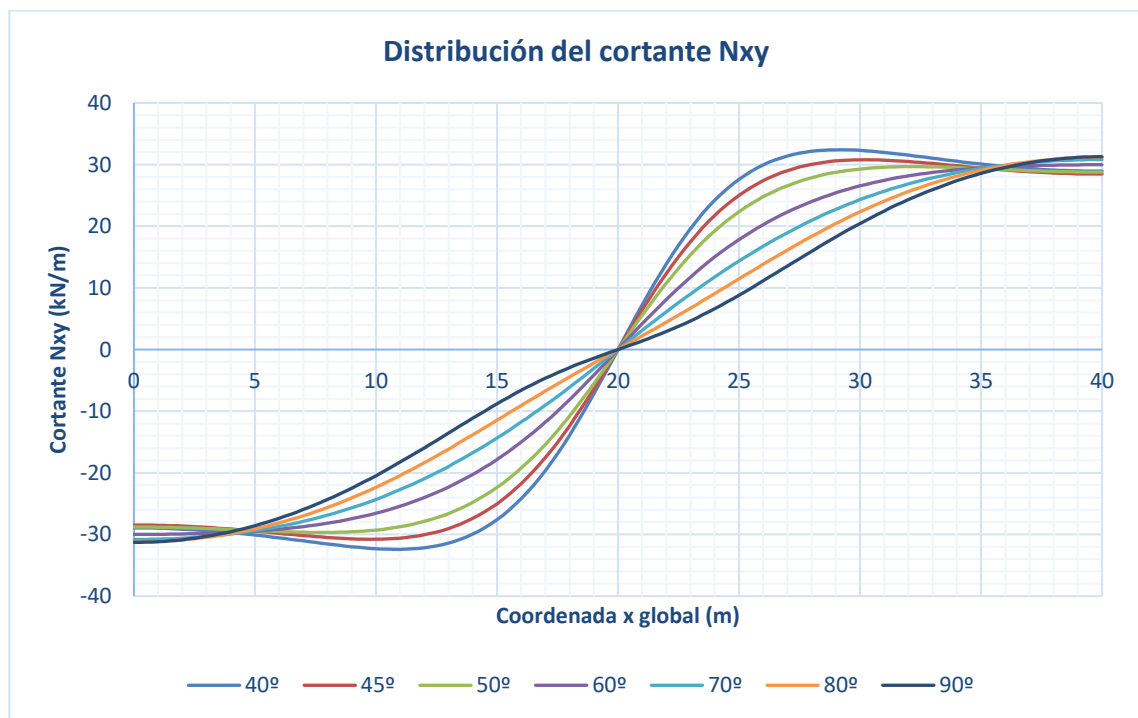


Figura 80: Distribución del cortante N_{xy} los modelos con 40° , 45° , 50° , 60° , 70° , 80° y 90° de inclinación de las almas

Por último, se muestra el cortante N_{xy} para todos los modelos, cuya distribución es antisimétrica. A medida que se disminuye la inclinación de las almas, el valor en las secciones de los apoyos se reduce ligeramente. Por el contrario, para las secciones que se encuentran en el intervalo entre $x=5\text{m}$ y $x=20\text{m}$, el cortante aumenta considerablemente (en el modelo de referencia el máximo se encuentra en los extremos, mientras que para el modelo cuyas almas se inclinan 40° , el máximo se obtiene en la sección $x=10.75\text{m}$).

Representando la variación del cortante máximo N_{xy} en función de la inclinación de las almas, se observa la influencia de este parámetro en dicho esfuerzo. En la gráfica (figura 81) se observa que, desde los 40° de inclinación hasta los 50° , el valor de N_{xy} disminuye, y la función presenta un mínimo en este punto. Posteriormente, al ir aumentando la inclinación hasta los 90° , el valor del cortante N_{xy} crece.

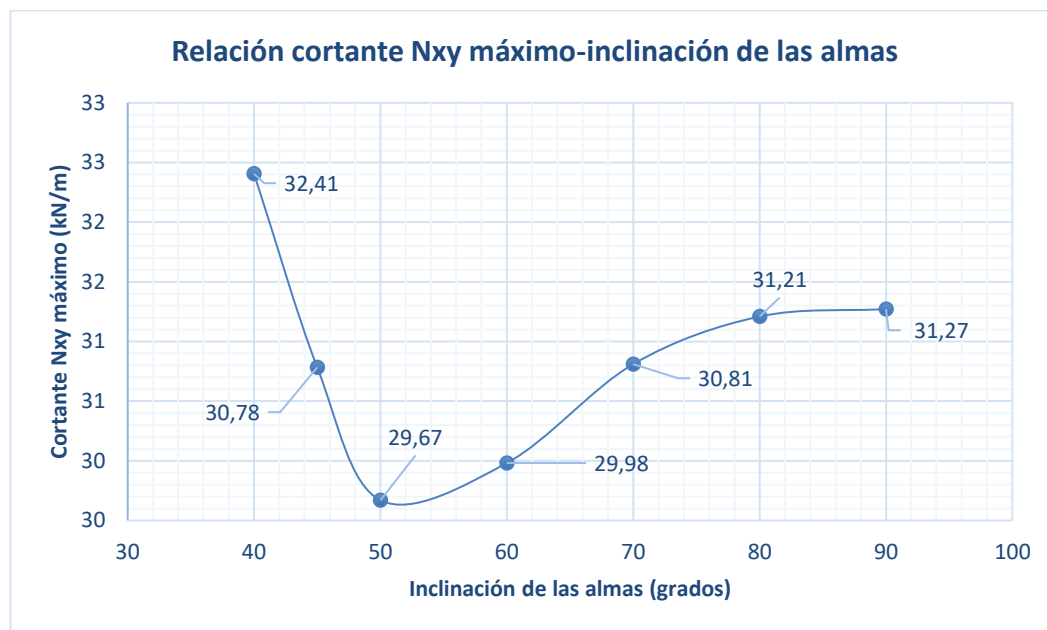


Figura 81: Relación cortante N_{xy} máximo-inclinación de las almas

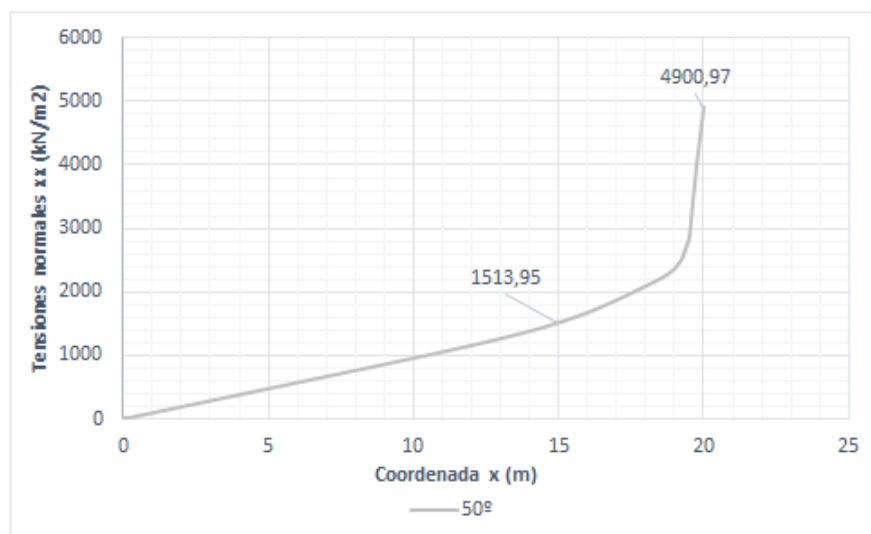
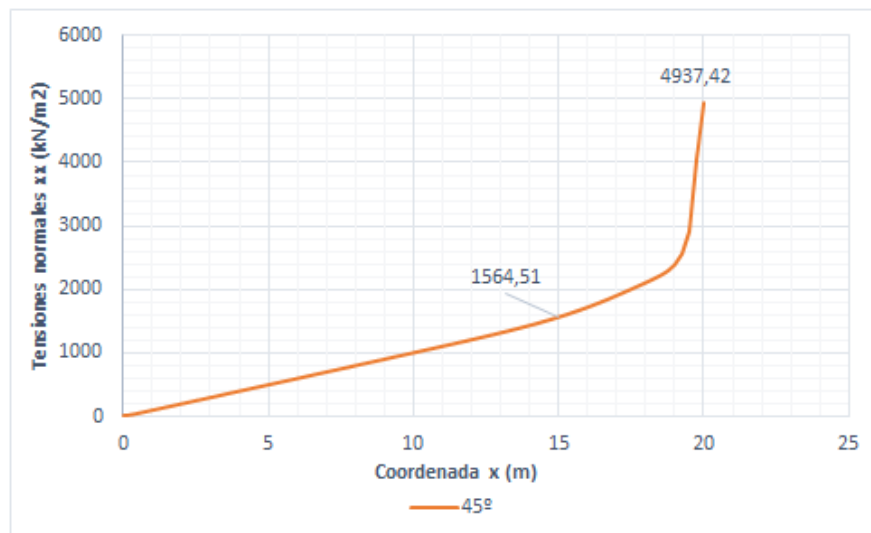
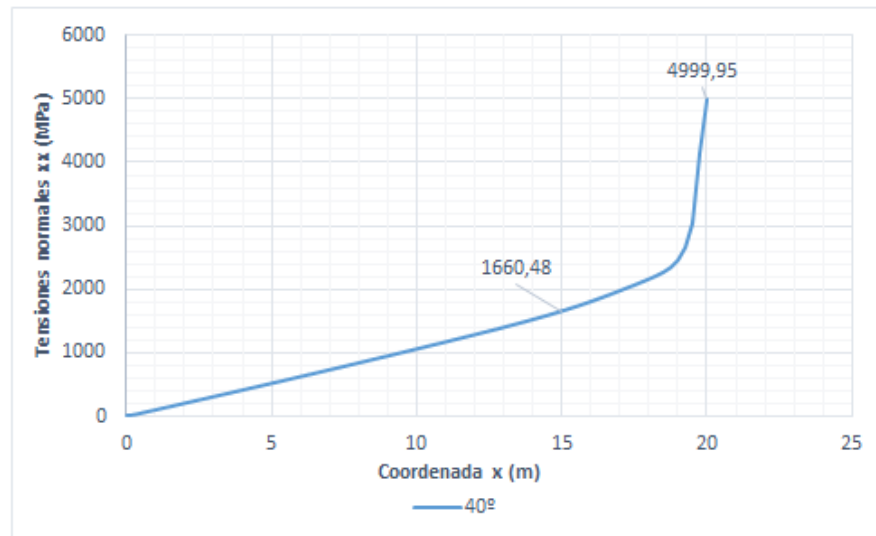
4.2.2.4 Tensiones

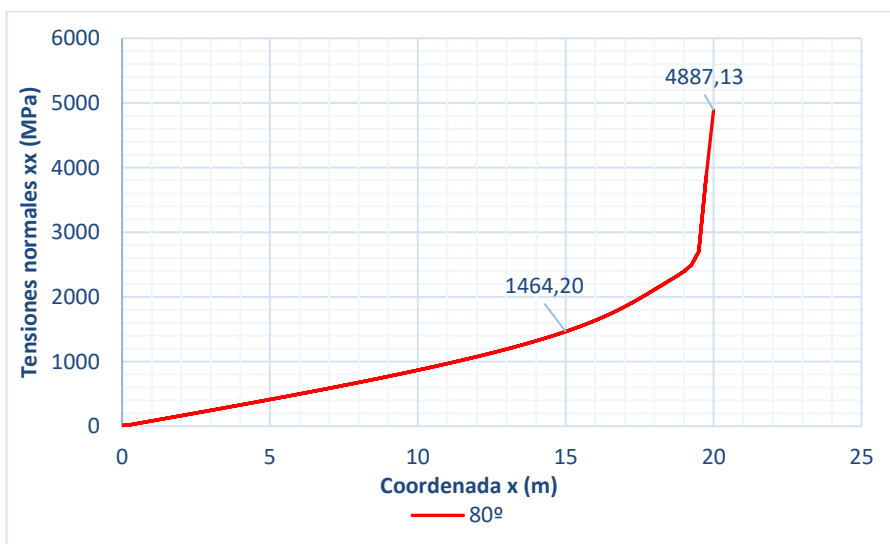
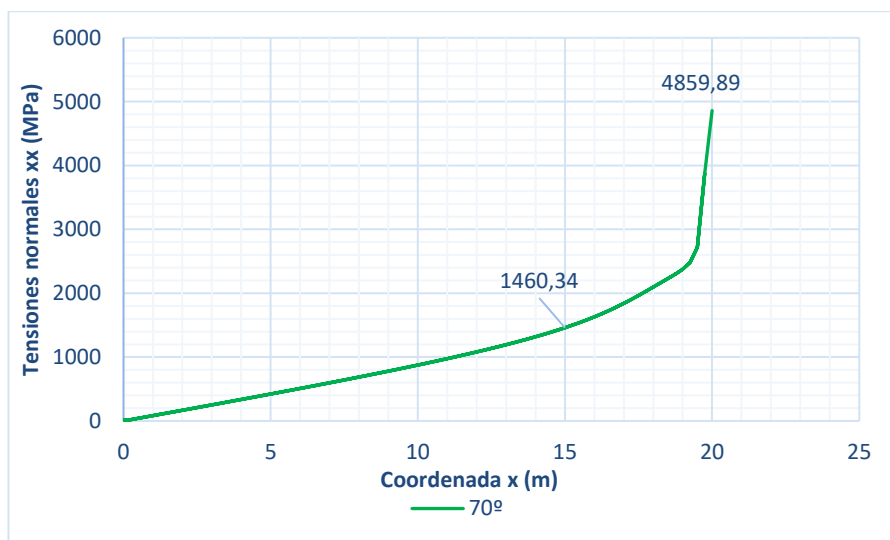
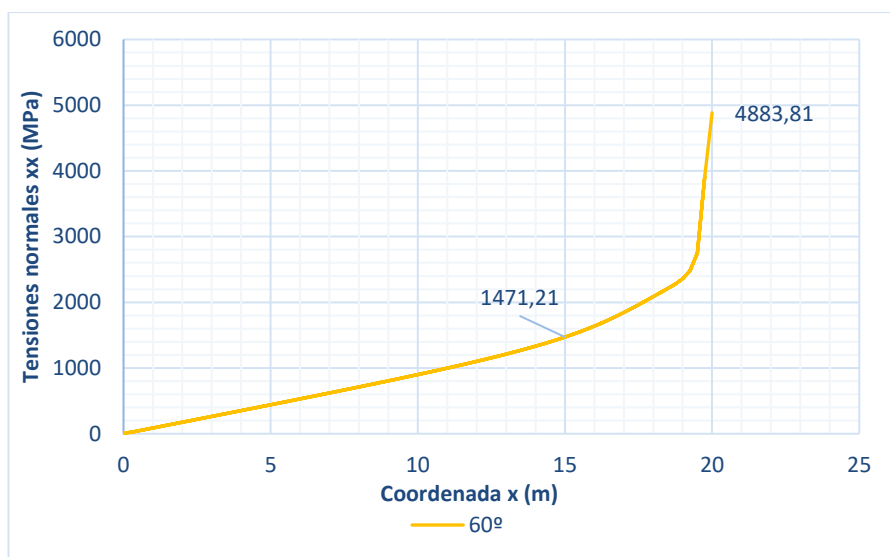
En este apartado se verá cómo se distribuyen las tensiones, tanto normales como tangenciales, a lo largo de la luz en los nudos 2, 3, 5 y 6. Además, se han graficado la relación entre los valores máximos alcanzados y se han representado las tensiones en las secciones más interesantes para el estudio.

4.2.2.4.1 Tensiones normales

Las tensiones normales en el nudo 2 se han representado en gráficas separadas para cada modelo ya que, como ocurría en el caso 1, la diferencia en la distribución es mínima. En todas las gráficas se puede ver la perturbación que provoca la carga puntual en el punto de aplicación, y la rapidez con la que se atenúa. Como se observa, a 5 metros de la sección central ($x=15\text{m}$), la tensión normal en el nudo 2 disminuye hasta un tercio de su valor máximo, el cual se produce siempre en el centro del vano.

Distribución de las tensiones normales en el nudo 2 a lo largo de la luz





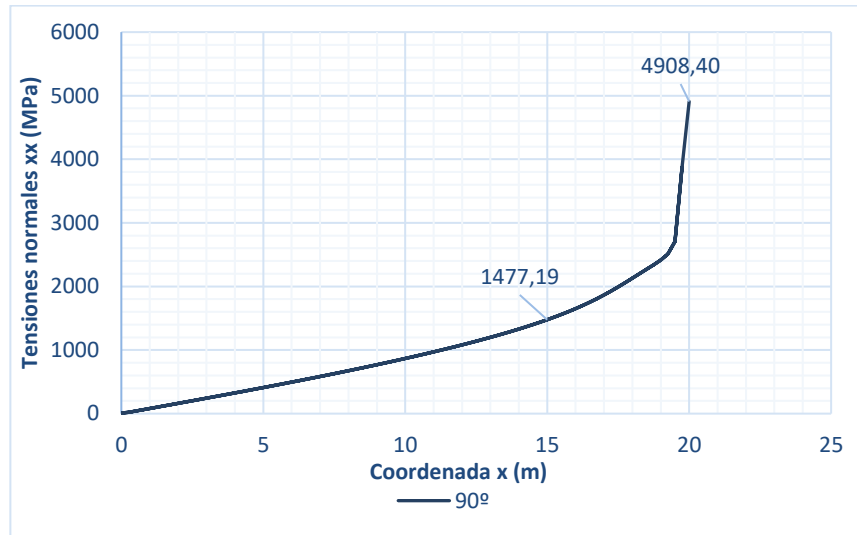


Figura 82: Distribución de las tensiones σ_{xx} (MPa) en el nudo 2 a lo largo de la luz de todos los modelos del caso 2

Como se muestra en la figura 83, las tensiones normales en el nudo 3 aumentan, a lo largo de toda la luz del puente, a medida que se disminuye la inclinación de las almas. Es decir, para una inclinación igual a 40°, se tienen mayores tensiones que cuando las almas son perpendiculares a la losa superior.

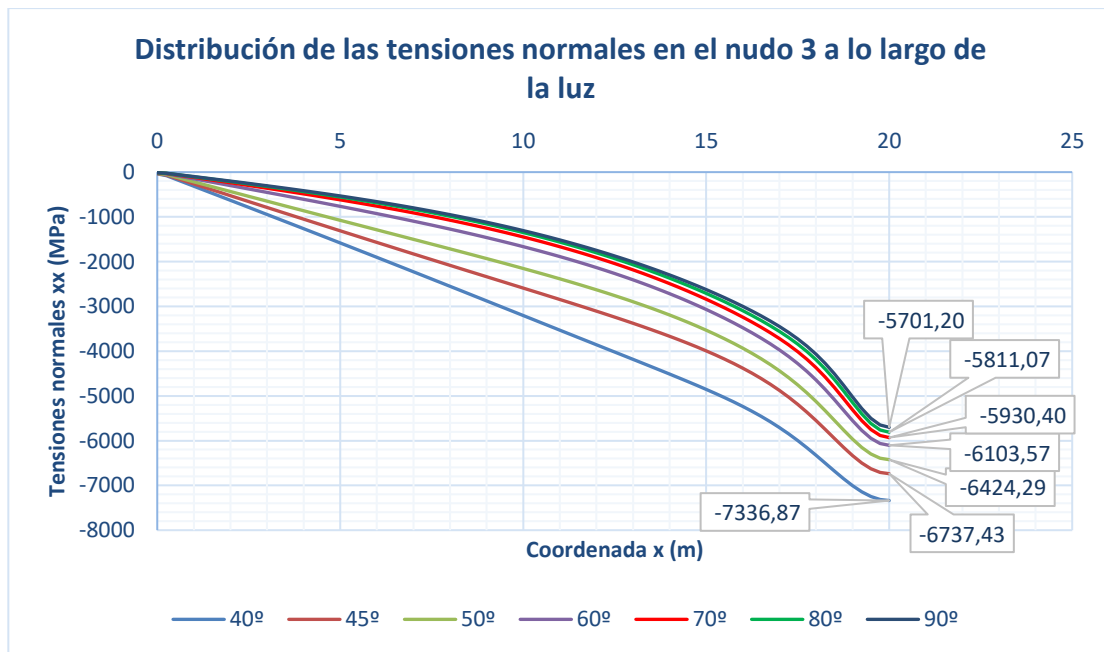


Figura 83: Distribución de las tensiones σ_{xx} (MPa) en el nudo 3 a lo largo de la luz de todos los modelos del caso 2

El aumento de la inclinación de las almas supone una disminución de la tensión máxima en el nudo 5, la cual se da en la sección central. Hasta la sección $x = 15\text{m}$ la distribución de los distintos modelos estudiados se asemejan bastante, como se muestra en la figura 84. A partir de este punto, la diferencia de las tensiones normales entre los modelos se hace más notoria.

Por otro lado, desde la sección del extremo hasta $x = 15\text{m}$, los modelos con menor inclinación de las almas son los que presentan mayores tensiones normales.

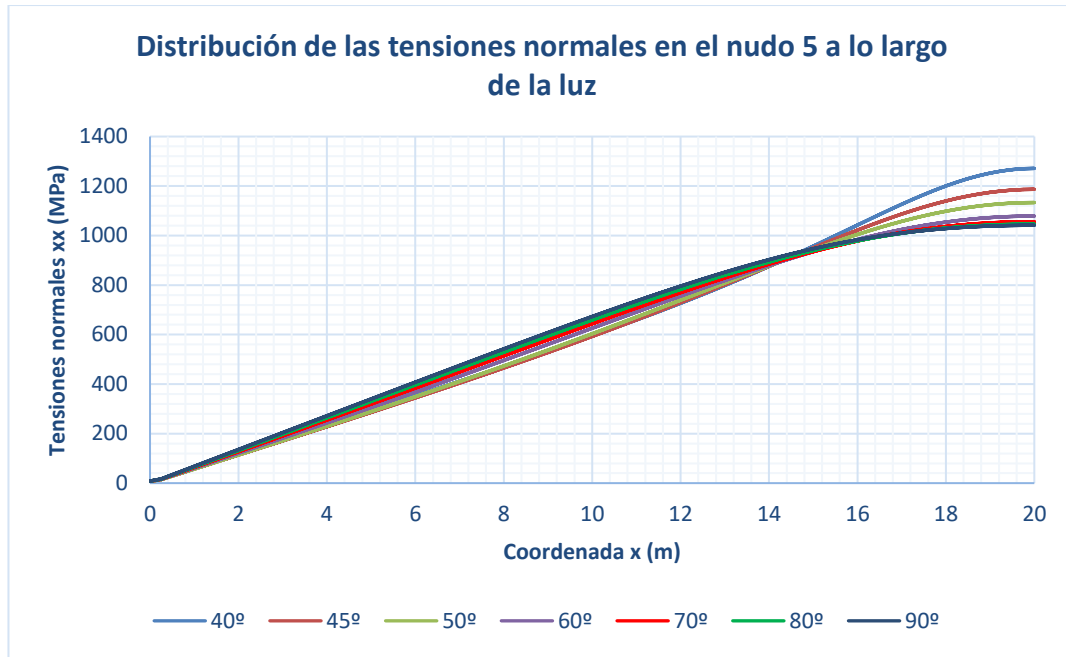


Figura 84: Distribución de las tensiones σ_{xx} (MPa) en el nudo 5 a lo largo de la luz de todos los modelos del caso 2

Se ha ampliado la gráfica anterior (figura 85) en la zona central del puente, para ver con más claridad lo expuesto en el párrafo anterior: al aumentar la inclinación de las almas, disminuyen las tensiones normales en las secciones próximas al centro del puente (a partir de $x=15\text{m}$).

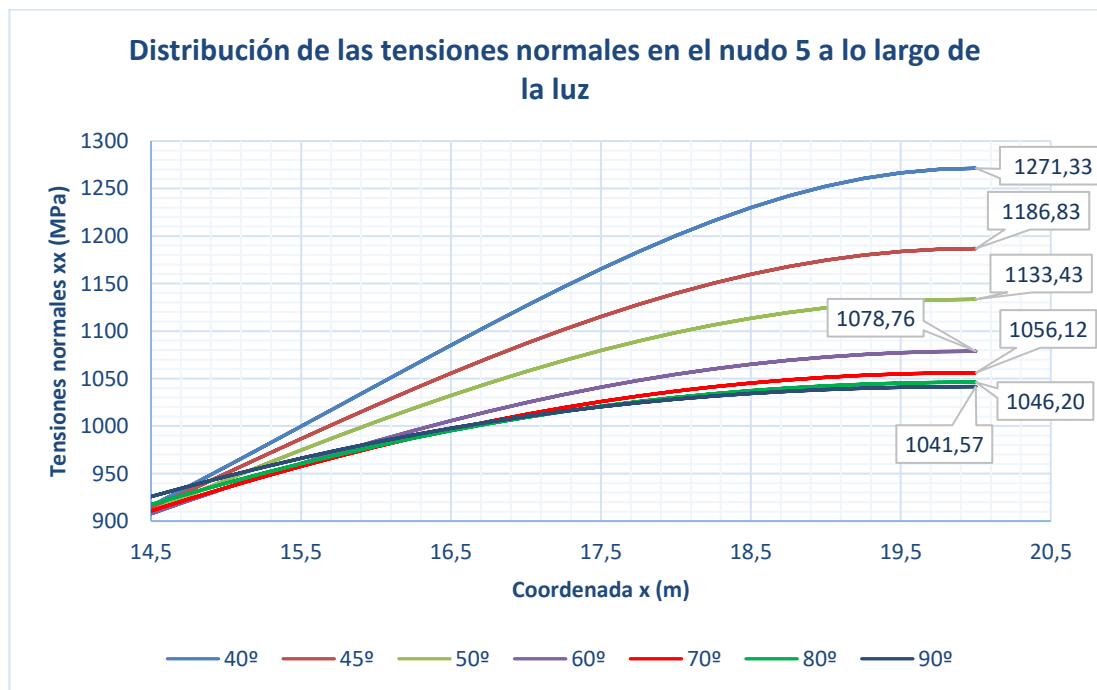


Figura 85: Distribución de las tensiones σ_{xx} (MPa) en el nudo 5 a lo largo de la luz de todos los modelos del caso 2

De la misma forma, las tensiones normales en el nudo 6 serán mayores cuanto menor inclinación tenga las almas.

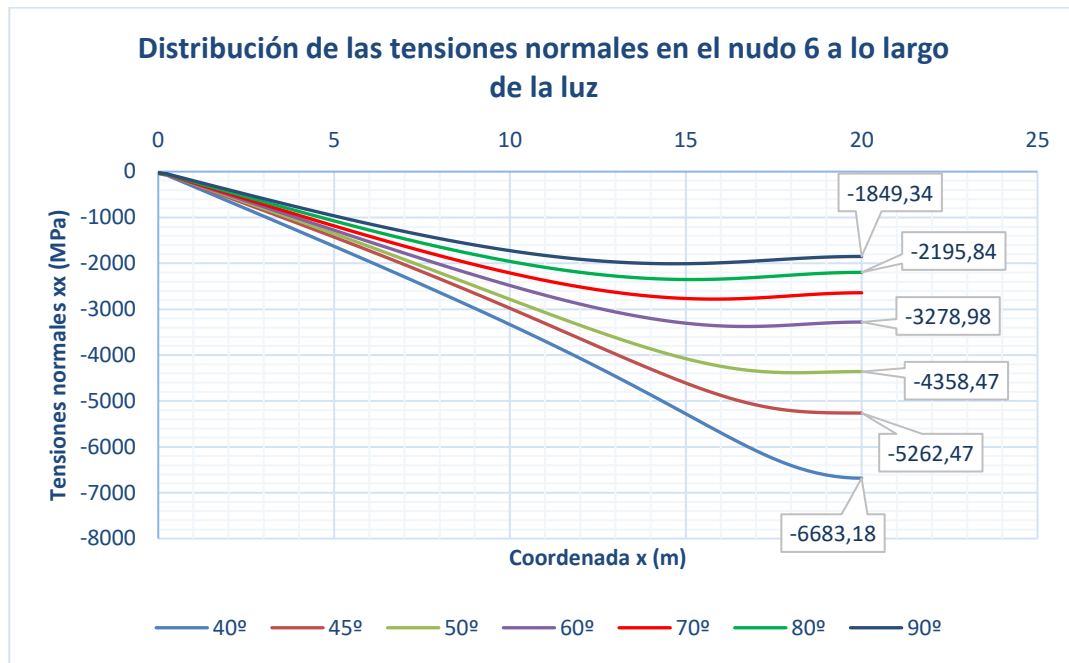


Figura 86: Distribución de las tensiones σ_{xx} (MPa) en el nudo 6 a lo largo de la luz de todos los modelos del caso 2

A continuación, se expone la evolución los valores máximos de las tensiones normales en los nudos 2, 3, 5 y 6 al variar la inclinación de las almas de los cajones. Mientras que en los nudos 2 y 5 apenas varía el valor de la tensión σ_{xx} , siendo ambos puntos de intersección entre las almas del cajón y la losa superior, la mayor variación se produce en los nudos 3 y 6. En estos nudos, la mayor tensión se alcanza para una inclinación de las almas igual a 40°, reduciéndose en los siguientes modelos, a medida que se incrementa la inclinación, teniéndose el valor mínimo en el modelo con las almas a 90°.

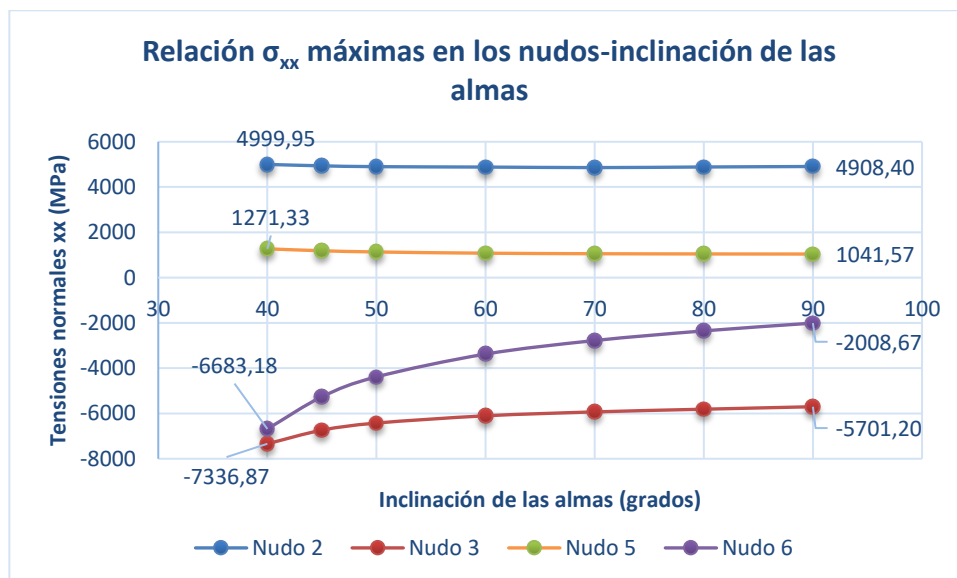


Figura 87: Relación σ_{xx} máximas en los nudos-inclinación de las almas

En las siguientes imágenes se muestran las tensiones normales para la sección central ($x=20\text{m}$) y para la sección $x=15\text{m}$, al igual que se hizo en el caso 1 y en el estudio de D. Javier Manterola.

Los modelos escogidos del caso 2 para representar las tensiones normales en la sección son los modelos con inclinaciones de las almas de 40° y 70°. Éstos serán suficiente para el análisis, ya que como se ha visto en las gráficas anteriores, las distribuciones de las tensiones de los modelos estudiados son análogas entre sí.

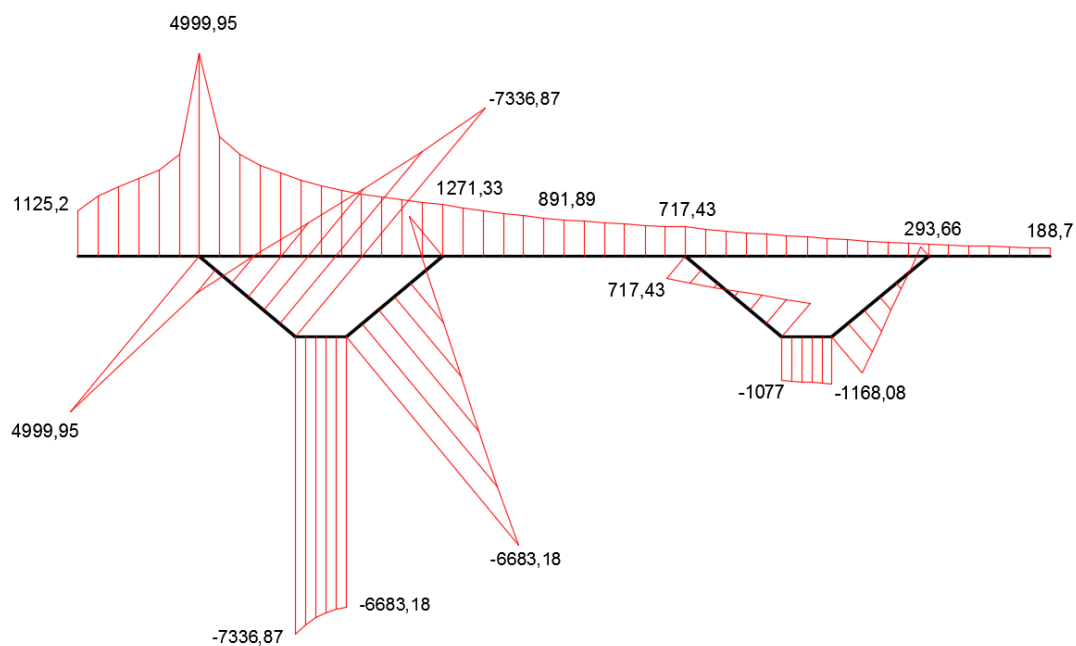


Figura 88: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=20$ m, del modelo con las almas inclinadas 40°

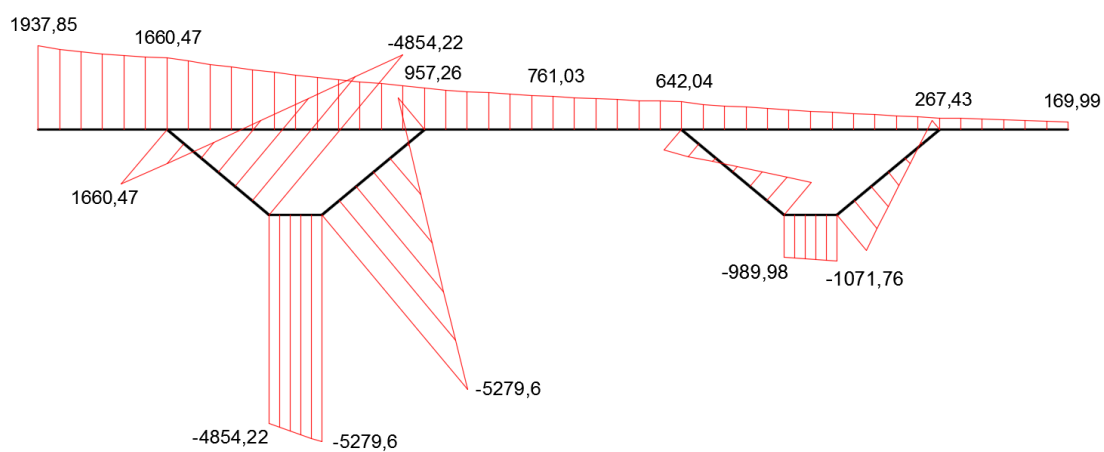


Figura 89: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=15$ m, del modelo con las almas inclinadas 40°

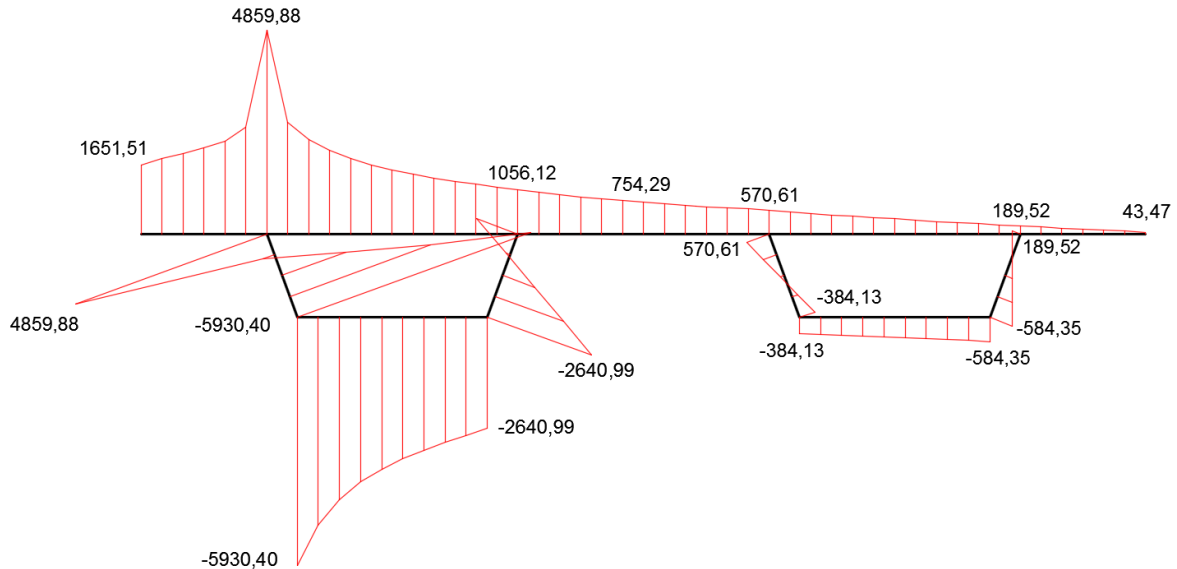


Figura 90: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=20$ m, del modelo con las almas inclinadas 70°

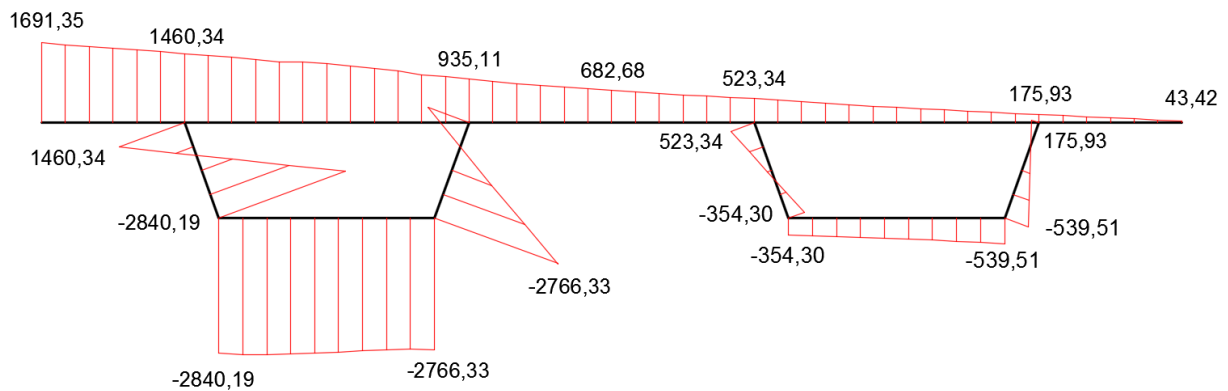


Figura 91: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=15$ m, del modelo con las almas inclinadas 70°

Con las figuras 88, 89, 90 y 91 se pone de manifiesto lo que se comentó en el apartado de desplazamientos para este caso. En el nudo 1, a medida que nos alejamos de la sección central, las tensiones normales se incrementan. Con el aumento de la inclinación de las almas, este incremento de tensiones es cada vez menor. Sin embargo, como se ve en la figura 92, únicamente cuando las almas están a 90° , las tensiones normales en el nudo1 disminuyen desde la sección central hasta los extremos.

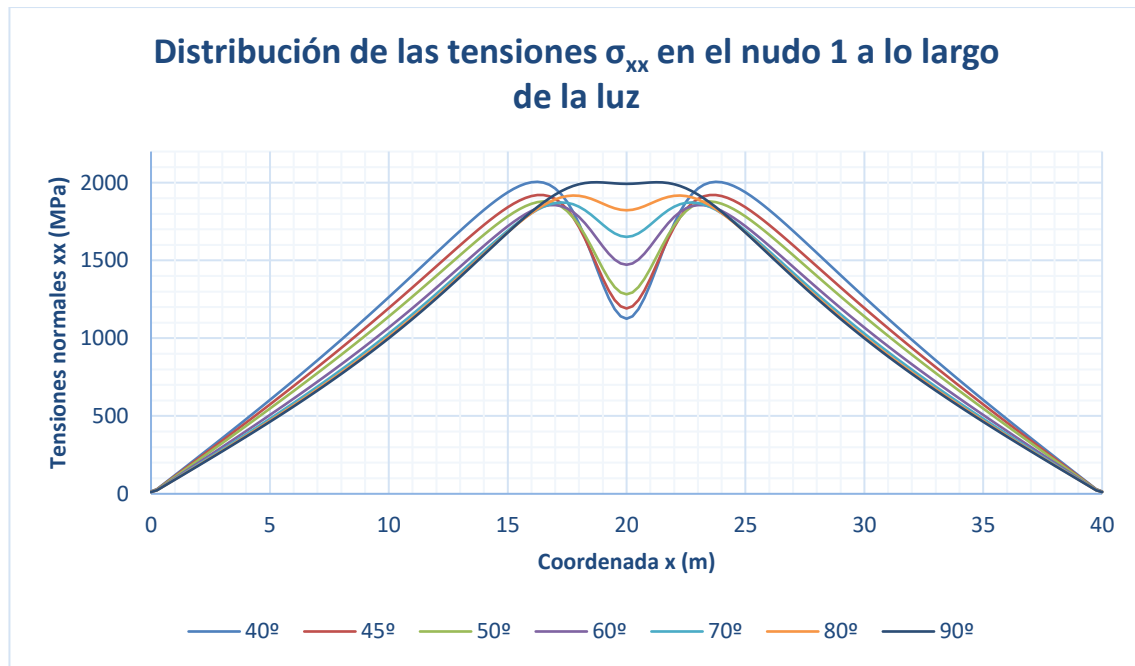


Figura 92: Distribución de las tensiones σ_{xx} (MPa) en el nudo 1 a lo largo de la luz de todos los modelos del caso 2

Este fenómeno que se observa es debido a lo siguiente: como se ha visto en apartados anteriores, los desplazamientos son mayores cuanto menos inclinadas se encuentran las almas (es decir, los mayores desplazamientos se encuentran en el modelo con almas inclinadas 40°). Por lo que, lo que se observa en la gráfica 92 es un fenómeno asociado a la deformación transversal de la sección, la cual es menos flexible cuanto más se acerque la inclinación a los 90° (sobre todo en la zona del voladizo). Al ser menores las deformaciones, las tensiones también lo serán.

4.2.2.4.2 Tensiones tangenciales

Se exponen a continuación las gráficas de las tensiones tangenciales que se obtienen en los nudos 2, 3, 5 y 6. Como se verá, la distribución de estas tensiones para los nudos 2 y 3 son similares en todos los modelos estudiados. Sin embargo, las tensiones en los nudos 5 y 6 sí varían al cambiar la inclinación de las almas.

Posteriormente, se muestran las tensiones tangenciales en las secciones $x=19.5\text{m}$ y $x=10\text{m}$ para los modelos con inclinaciones de las almas de 40° y 70° .

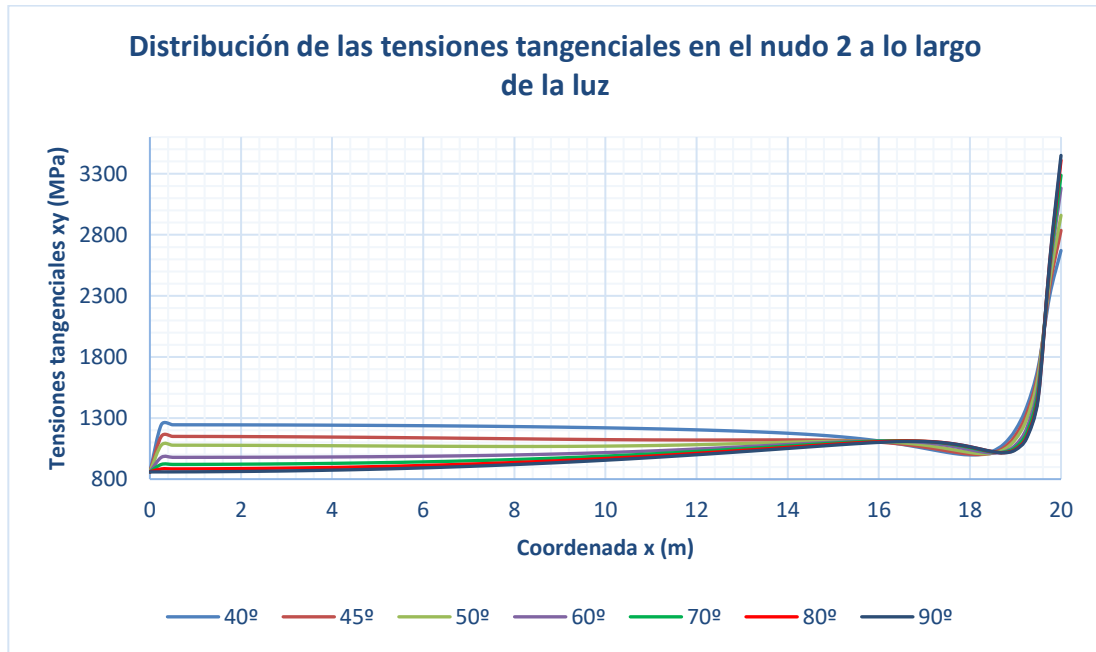


Figura 93: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 2, a lo largo de la luz, para los modelos del caso 2

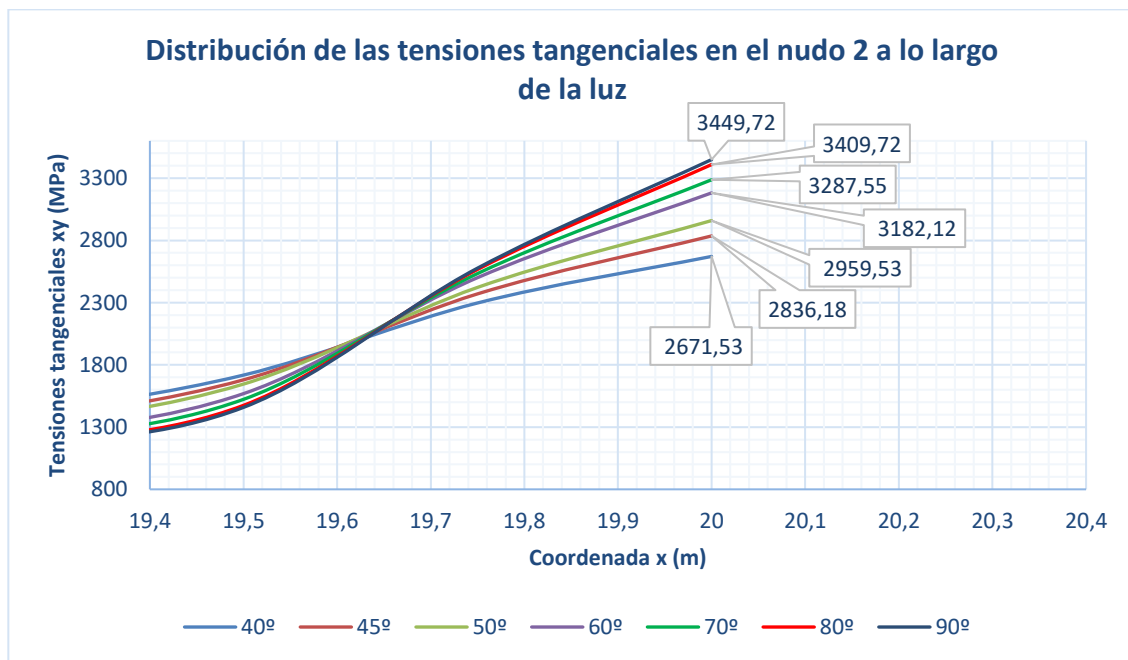


Figura 93.1: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 2, a lo largo de la luz, para los modelos del caso 2

Se puede observar en las gráficas superiores (figura 93 y 93.1) la mínima diferencia que hay en las tensiones tangenciales del nudo 2 entre los modelos estudiados. En la sección central, al aumentar la inclinación de las almas, también aumenta la tensión tangencial: en el modelo con inclinación de 40° se tiene una tensión de 2671.53 kPa, mientras que en el modelo cuya inclinación es de 90°, la tensión aumenta hasta los 3449.72 kPa. Sin embargo, en las secciones del extremo ocurre lo contrario: al aumentar la inclinación de las almas, disminuye la tensión en dicha sección.

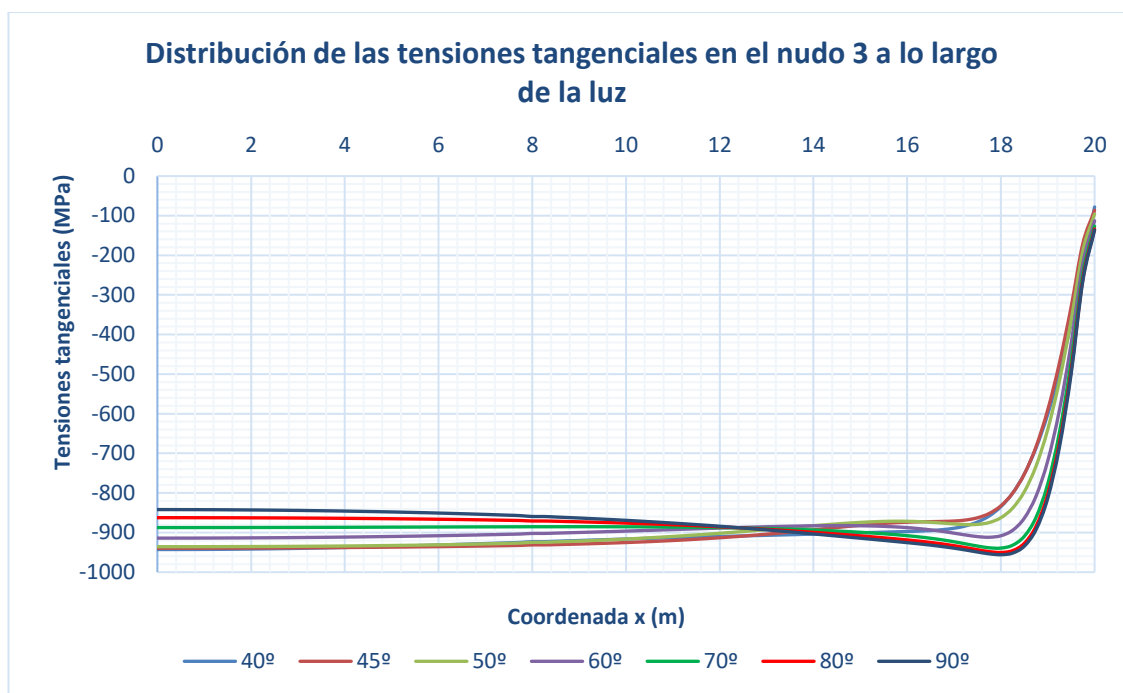


Figura 94: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 3, a lo largo de la luz, para los modelos del caso 2

En el nudo 3 sucede un hecho similar al explicado en el nudo 2. En las secciones extremas, al incrementar la inclinación de las almas, aumenta el valor de la tensión tangencial. Por el contrario, en la sección central, al incrementar la inclinación de las almas, disminuye la tensión. Además, en dicho punto, alcanza su valor máximo.

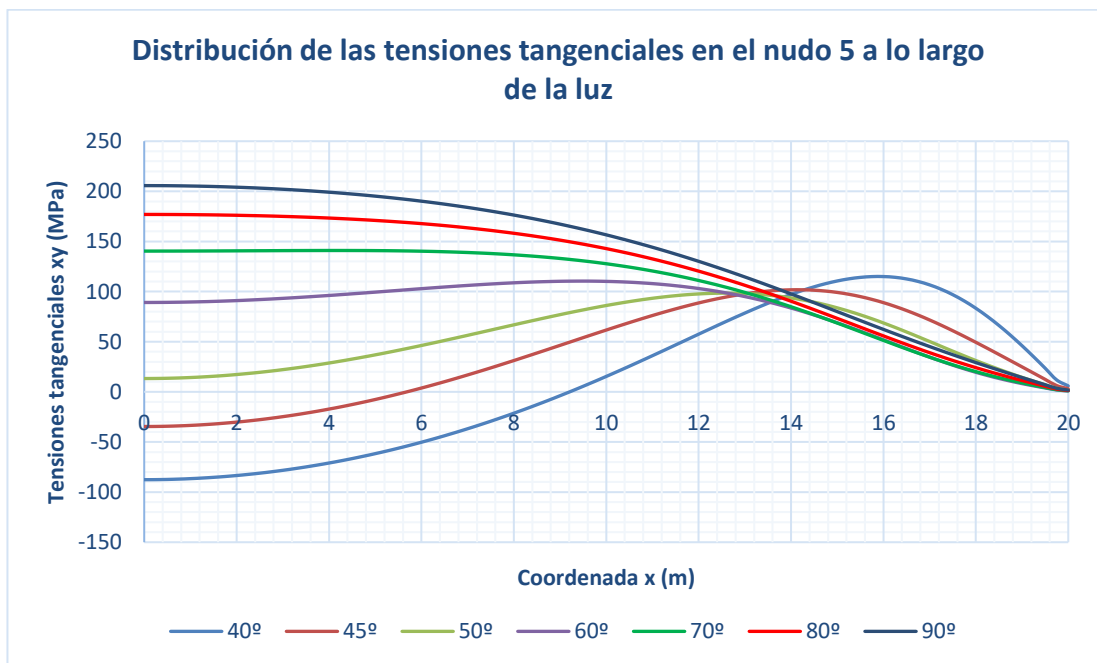


Figura 95: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 5, a lo largo de la luz, para los modelos del caso 2

Como se puede apreciar en la figura 95, las tensiones tangenciales en el nudo 5 sí varían considerablemente de uno a otro modelo. Para inclinaciones menores (40° y 45°) se produce un cambio de signo en la distribución de las tensiones, siendo negativas en los extremos y positivas en la zona central de la luz. En cambio, para el resto de inclinaciones, las tensiones no cambian de signo en toda la mitad de la luz del vano.

Asimismo, para los modelos de 40° y 45° de inclinación de las almas, la tensión tangencial máxima se alcanza

en las secciones $x = 16.5\text{m}$ y $x = 14.25\text{m}$, respectivamente, mientras que, en el resto de casos, el máximo se encuentra en las secciones de los extremos.

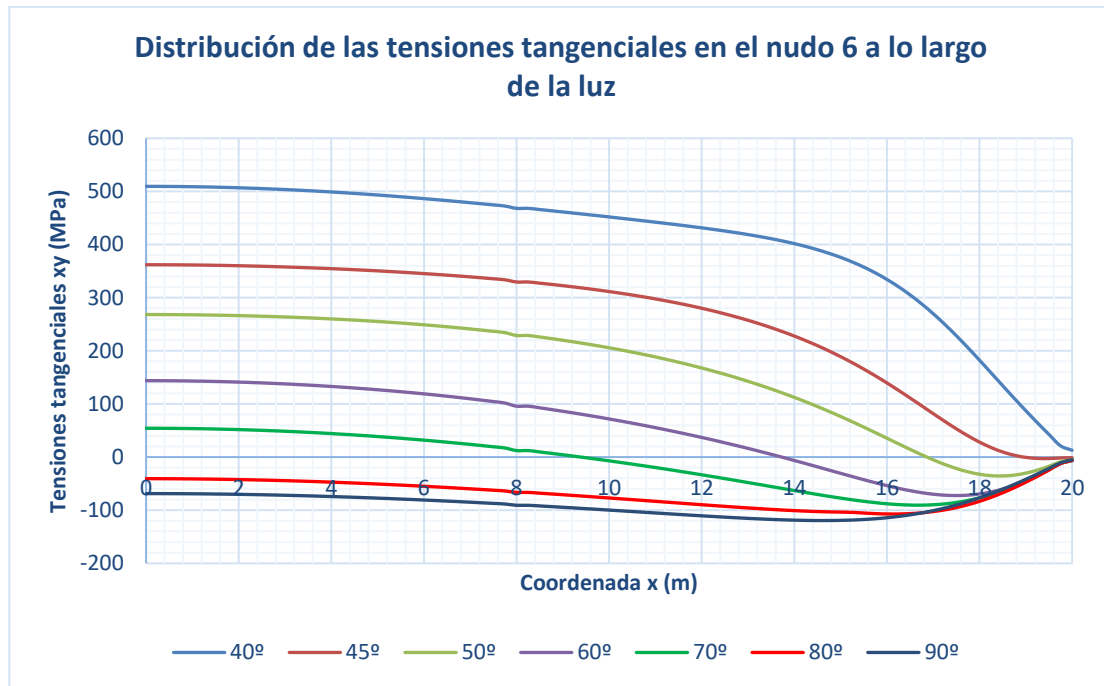


Figura 96: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 6, a lo largo de la luz, para los modelos del caso 2

Como se puede ver en la figura 96, al cambiar la inclinación de las almas y alcanzar los 80° - 90° , las tensiones tangenciales en el nudo 6 no sufren cambios de signo. Al disminuir la inclinación, se ve en los modelos de 70° , 60° , 50° y 45° (aunque en éste último apenas se aprecia), el cambio de signo que se produce en la distribución de las tensiones tangenciales.

En la siguiente gráfica (figura 97) se representa la variación de las tensiones tangenciales máximas en los nudos 2, 3, 5 y 6 al cambiar la inclinación de las almas. En los nudos 3 y 5, el valor de la tensión τ_{xy} máxima varía levemente con las diferentes inclinaciones de las almas, aunque se podría decir que se mantiene aproximadamente constante. Por otro lado, en los nudos 2 y 6 sí que se aprecia una pequeña variación de estas tensiones, aumentando en el caso del nudo 2, y disminuyendo en el caso del nudo 6, en el que, además, para una inclinación de 65° aproximadamente, se produce un cambio de signo.

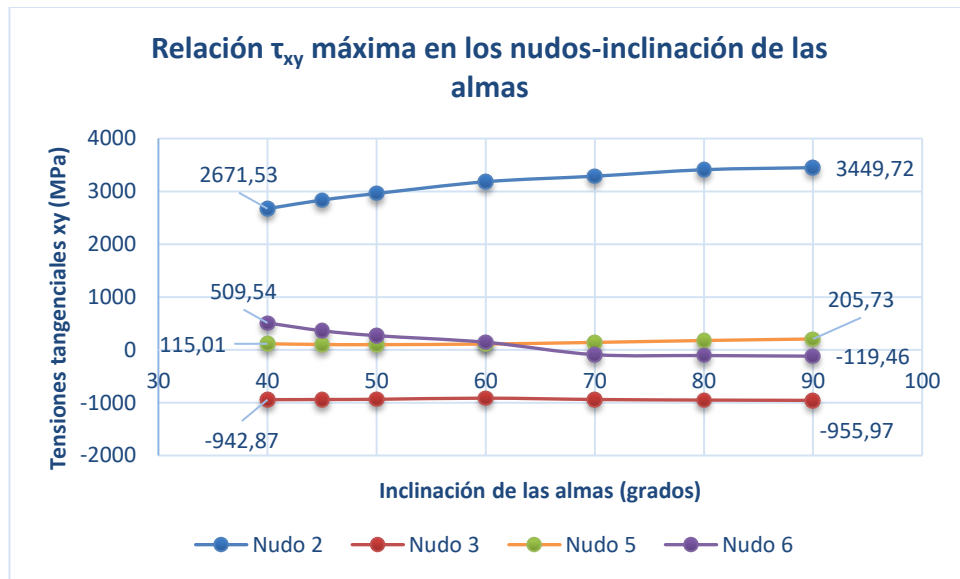


Figura 97: Relación τ_{xy} máxima en los nudos-inclinación de las almas

Finalmente, se puede ver en las siguientes imágenes las tensiones tangenciales en las secciones $x=19.5\text{m}$ y $x=10\text{m}$ de los modelos con inclinaciones de las almas de 40° y 70° . En ambos modelos se aprecia la gran perturbación que provoca la carga puntual sobre el alma izquierda del cajón izquierdo, siendo las tensiones de valores mucho menores en el cajón derecho. Sin embargo, en secciones más alejadas del punto de aplicación de la carga, dichas tensiones se hacen más uniforme en la sección, aumentando τ_{xy} en el cajón derecho, y disminuyendo en el cajón cargado.

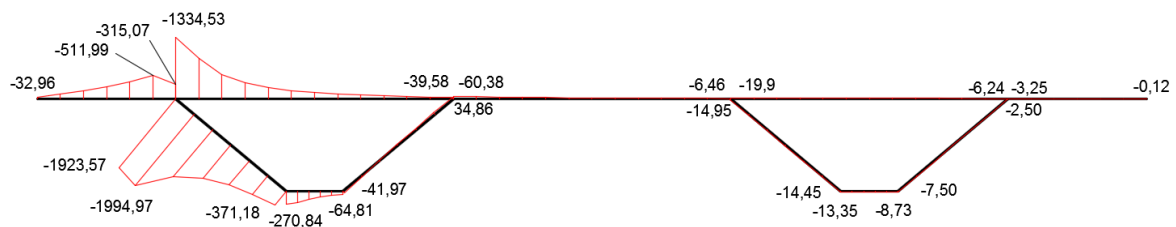


Figura 98: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=19.5\text{ m}$, del modelo con las almas inclinadas 40°

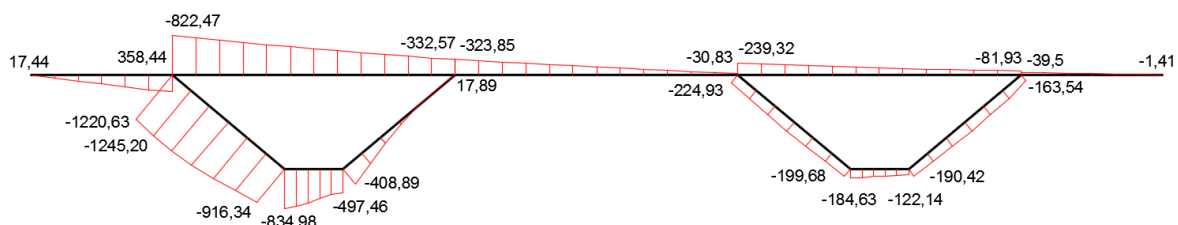


Figura 99: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=10\text{ m}$, del modelo con las almas inclinadas 40°

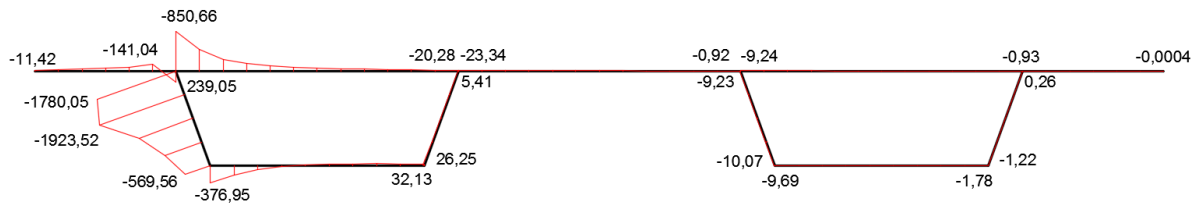


Figura 100: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=19.5$ m, del modelo con las almas inclinadas 70°

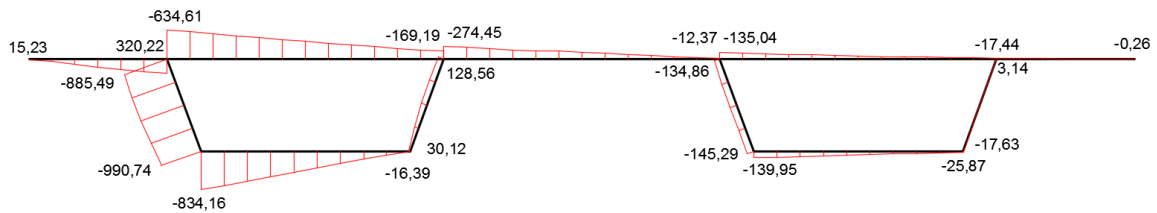


Figura 101: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=10$ m, del modelo con las almas inclinadas 70°

4.3 Caso 3: Variación del ancho de los cajones

4.3.1 Descripción del modelo

Para el estudio del comportamiento del puente al variar el ancho de los cajones, se han realizado 12 modelos, cuya anchura de los cajones va desde los 2 metros hasta los 8, incrementándose cada vez 0.5 metros. En este caso, la longitud de la losa superior de la sección también varía, ya que la separación entre cajones se ha mantenido constante en todos los modelos. La influencia de su variación se verá en el siguiente apartado.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos.

4.3.2 Resultados obtenidos en el caso 3

4.3.2.1 Desplazamientos

En las siguientes imágenes se muestran los desplazamientos para los modelos de 2, 3, 4, 7 y 8 metros de ancho de los cajones. El modelo de 6 metros de ancho corresponde al modelo de referencia (estudio de D. Javier Manterola).

Como se puede observar, el ancho de los cajones influye considerablemente en la distribución de los desplazamientos. En las siguientes imágenes se puede ver que, al aumentar la anchura del cajón, la zona de influencia de la carga es cada vez menor en el ala izquierda de la sección. En el modelo de 2 metros de ancho de cajón (figura 102), en las inmediaciones de la carga se observa que los mayores desplazamientos se dan en una zona que tiene forma de V. Al aumentar el ancho, esta zona evoluciona, de manera que adopta una forma de U. Es decir, los desplazamientos de los puntos de la losa superior sobre el alma cargada aumentan. Al seguir incrementando la longitud del ancho de los cajones, esta forma de U se va cerrando en la zona del voladizo del cajón izquierdo.

Por otro lado, al aumentar el ancho del cajón, aumenta la longitud de la losa superior, por lo que, transversalmente, la zona de influencia de la carga de los desplazamientos también disminuye.

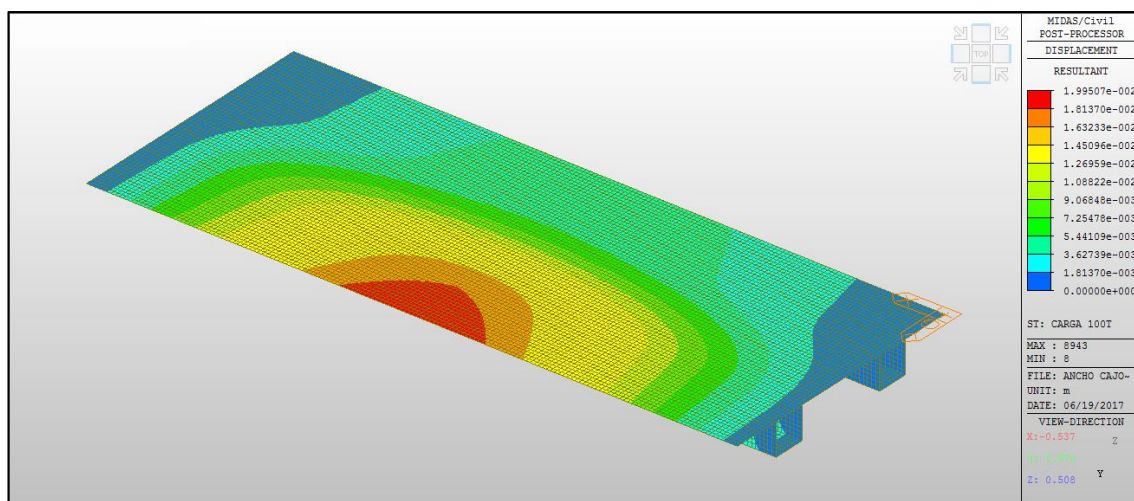


Figura 102: Desplazamientos (m) del modelo con un ancho de cajones de 2 metros

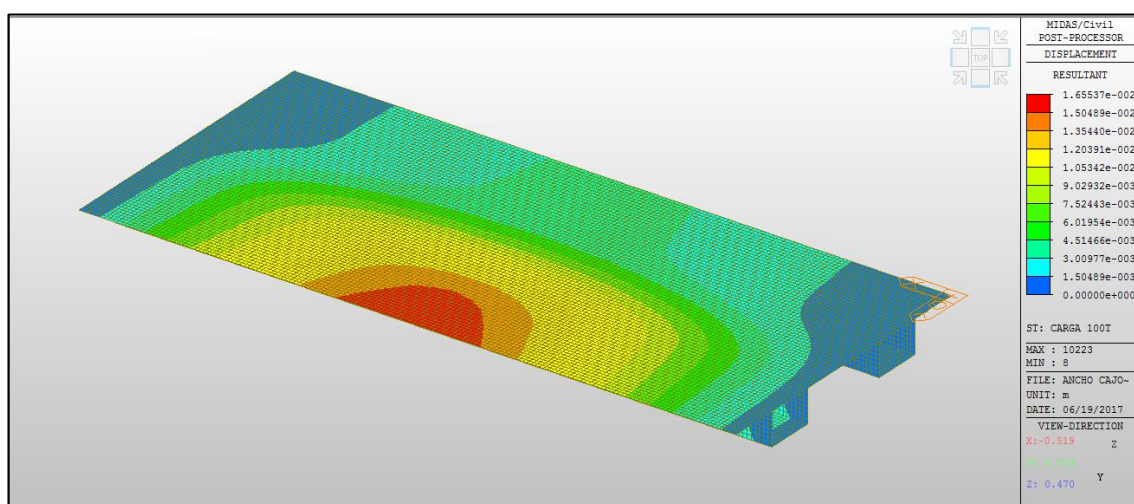


Figura 103: Desplazamientos (m) del modelo con un ancho de cajones de 3 metros

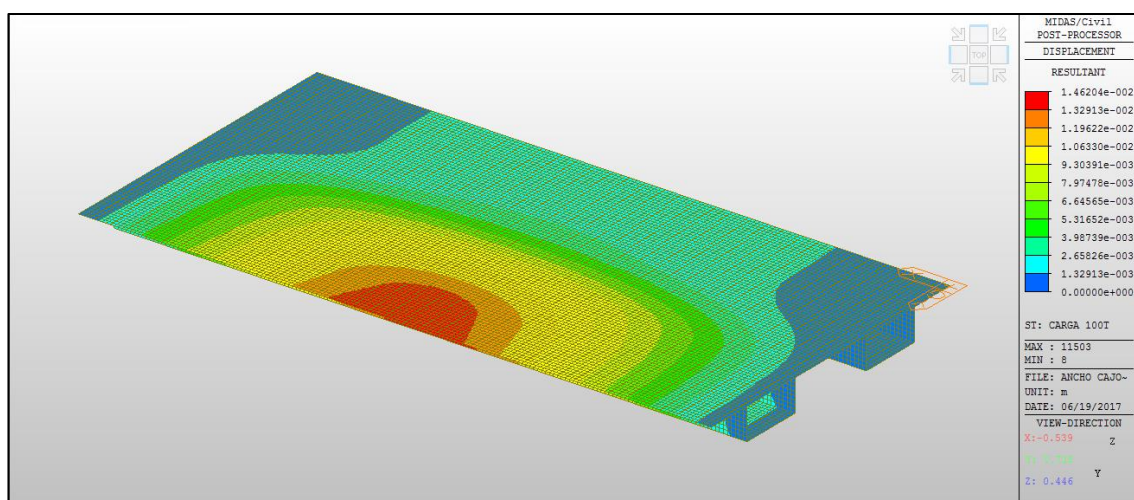


Figura 104: Desplazamientos (m) del modelo con un ancho de cajones de 4 metros

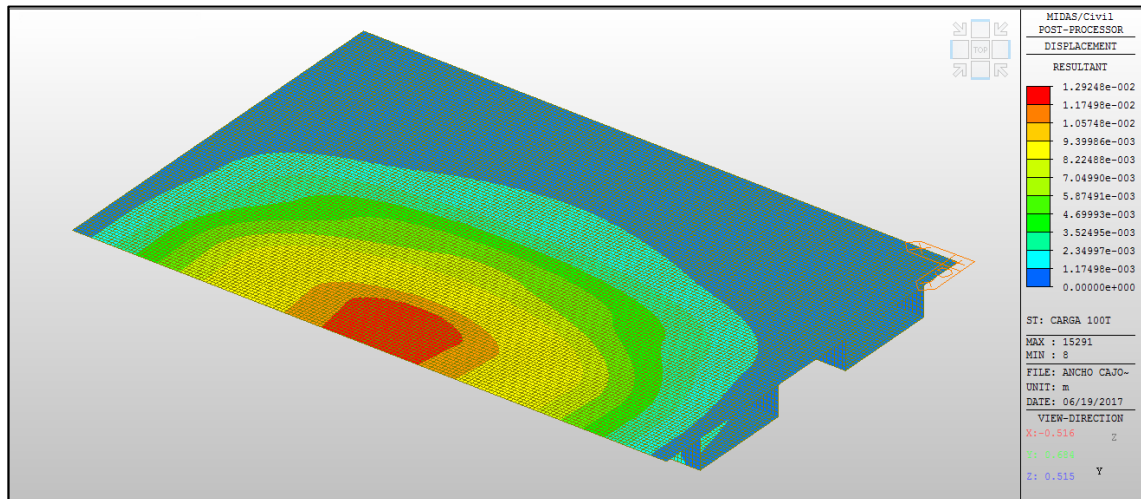


Figura 105: Desplazamientos (m) del modelo con un ancho de cajones de 7 metros

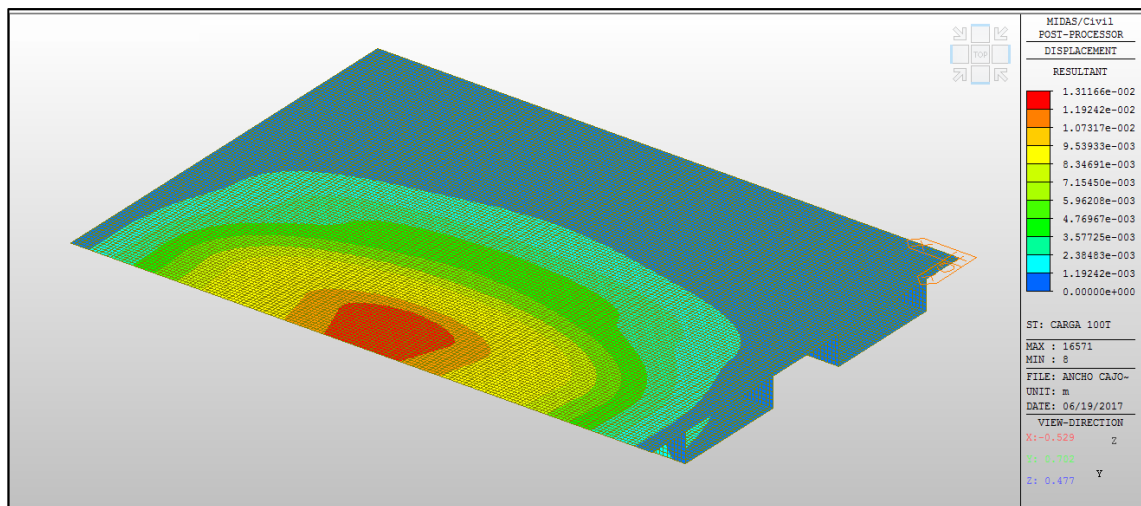


Figura 106: Desplazamientos (m) del modelo con un ancho de cajones de 8 metros

Las siguientes gráficas (figura 107 y 108) recogen cómo varía la flecha (desplazamiento vertical) de los nudos 2, 3, 5 y 6 (cajón izquierdo) y de los nudos 8, 9, 11 y 12 (cajón derecho) al modificar el ancho de los cajones.

De las cuatro almas que conforman la sección del puente, el alma izquierda del cajón izquierdo es en la que más influye la variación de la anchura del cajón. Como se observa en la figura 107 los desplazamientos verticales de los nudos 5 y 6 disminuyen conforme se incrementa el ancho de los cajones. Sin embargo, los nudos 2 y 3 (alma izquierda del cajón izquierdo) alcanzan su flecha máxima en el modelo con el ancho mínimo (2 metros). A partir de este punto, el desplazamiento vertical disminuye hasta que el ancho de los cajones alcanza los 5 metros, donde converge a un valor pseudoconstante hasta el ancho de 8 metros.

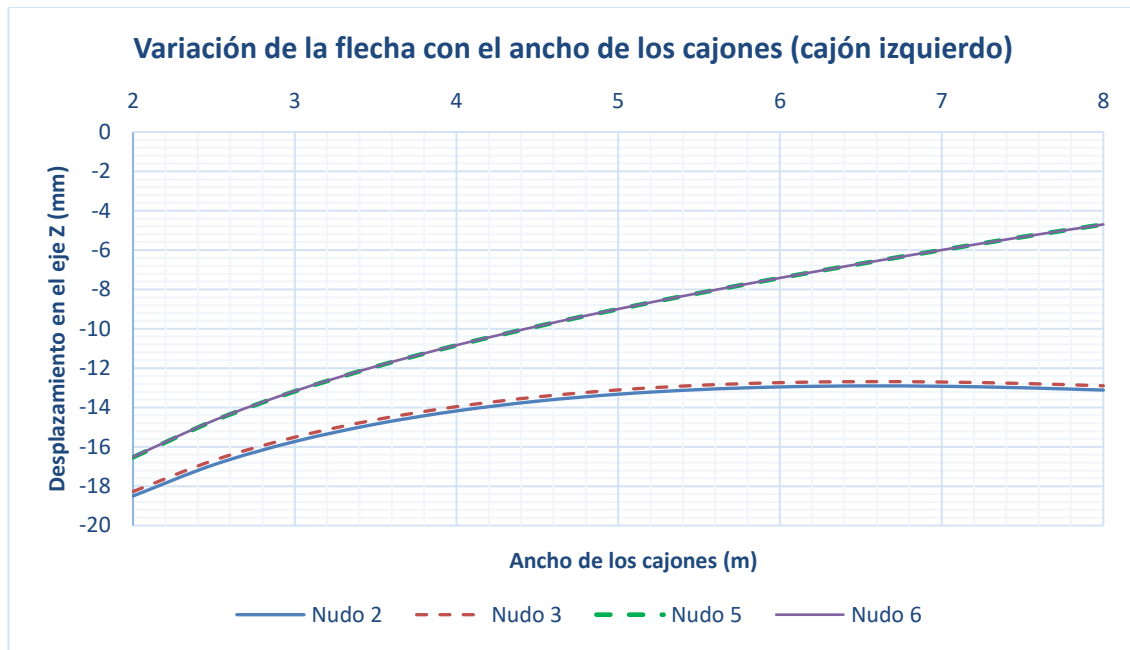


Figura 107: Desplazamientos verticales del cajón izquierdo al variar el ancho de los cajones

Los desplazamientos verticales del cajón derecho (figura 108), al igual que ocurría en los casos 1 y 2, son menores que los del cajón cargado, como era de esperar. El alma derecha del cajón derecho (del nudo 11 al nudo 12) es la que presenta menores desplazamientos, al ser la más alejada del punto de aplicación de la carga.

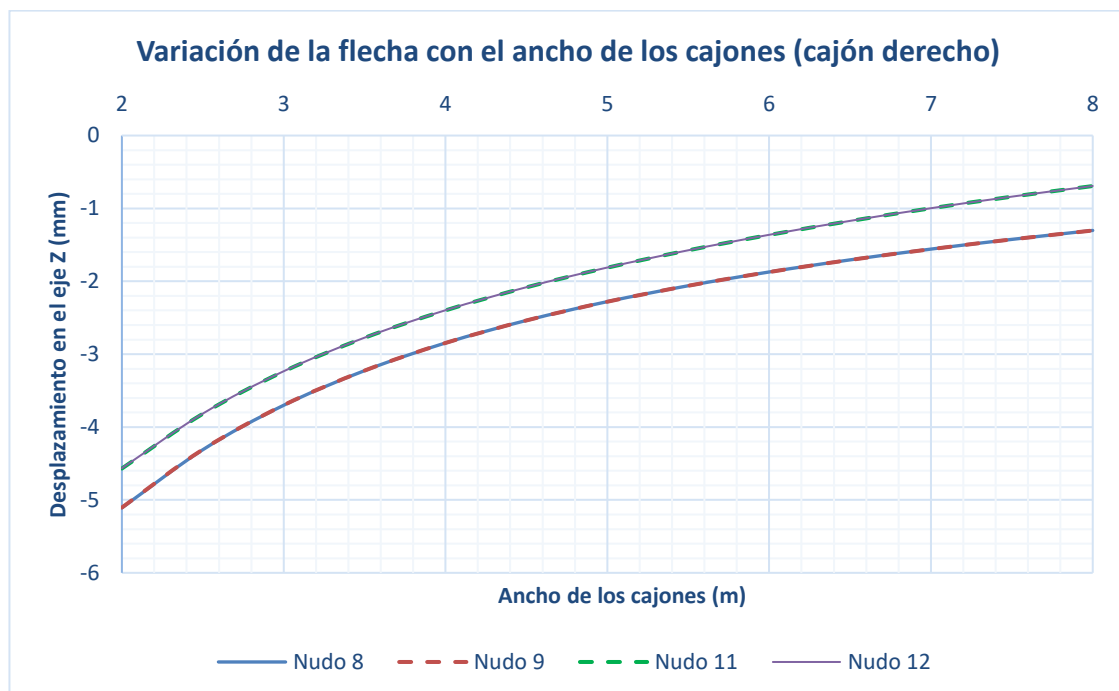


Figura 108: Desplazamientos verticales del cajón derecho al variar el ancho de los cajones

Si se representan las flechas máximas de cada uno de los modelos estudiados para este caso, se obtiene una gráfica como la de la figura 109. A medida que se aumenta el ancho de los cajones, la flecha disminuye, tendiendo a un valor de, aproximadamente, 13 mm, como se observa en la gráfica. Además, con un polinomio de orden tres se puede aproximar con bastante exactitud la evolución de la flecha máxima.

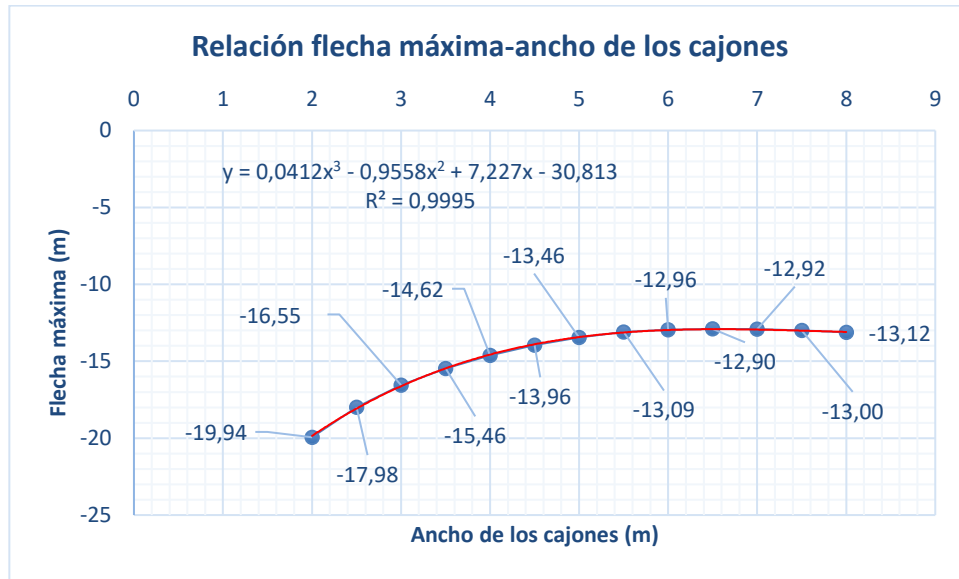


Figura 109: Relación flecha máxima-ancho de los cajones

4.3.2.2 Distorsión

De la misma forma que se ha procedido en los casos anteriores, se ha calculado la distorsión de ambos cajones para la sección central, de todos los modelos estudiados en este caso.

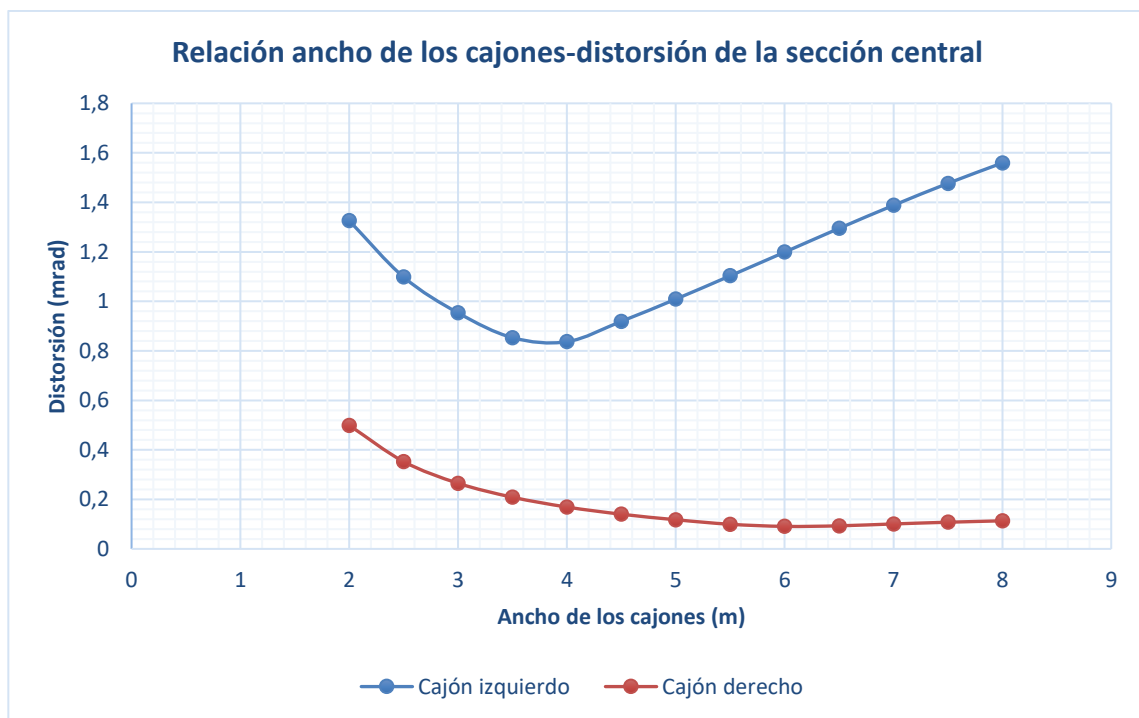


Figura 110: Relación ancho de los cajones-distorsión de la sección central

La distorsión del cajón derecho es mucho menor que la del cajón izquierdo para todos los modelos, como se puede observar en la gráfica anterior.

Mientras que la distorsión del cajón derecho disminuye desde el primer modelo (ancho del cajón igual a 2 metros) hasta el modelo de 5.5 metros de ancho (punto a partir del cual adquiere un valor aproximadamente constante), la distorsión del cajón izquierdo decrece desde el modelo de 2 metros de ancho hasta el de 4

metros, punto de inflexión donde la distorsión comienza a aumentar con pendiente constante hasta alcanzar un ancho de cajón de 8 metros.

4.3.2.3 Esfuerzos

Para la representación de los esfuerzos se han escogido los modelos correspondientes a 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros de ancho de cajón, con el fin de mostrar cómo influye la variación de dicho parámetro geométrico en cada uno de los esfuerzos, de la manera más clara posible.

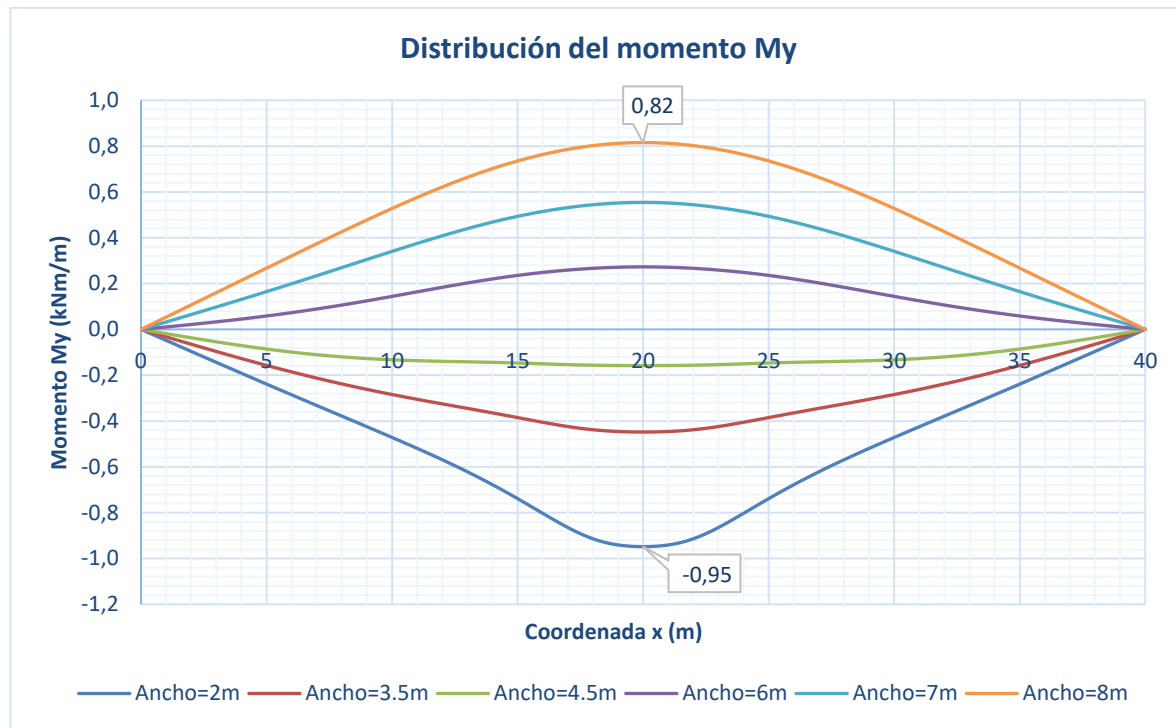


Figura 111: Distribución del momento M_y para los modelos de 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros de ancho de cajones

Al igual que en el modelo de D. Javier Manterola, los momentos flectores M_y son los de menor cuantía, en relación al resto de esfuerzos. Como se muestra en la figura 111, en ninguno de los modelos del estudio se alcanza un valor máximo igual a la unidad.

Por un lado, los modelos con menor ancho tienen momentos flectores negativos, mientras que los de mayor ancho presentan momentos flectores positivos.

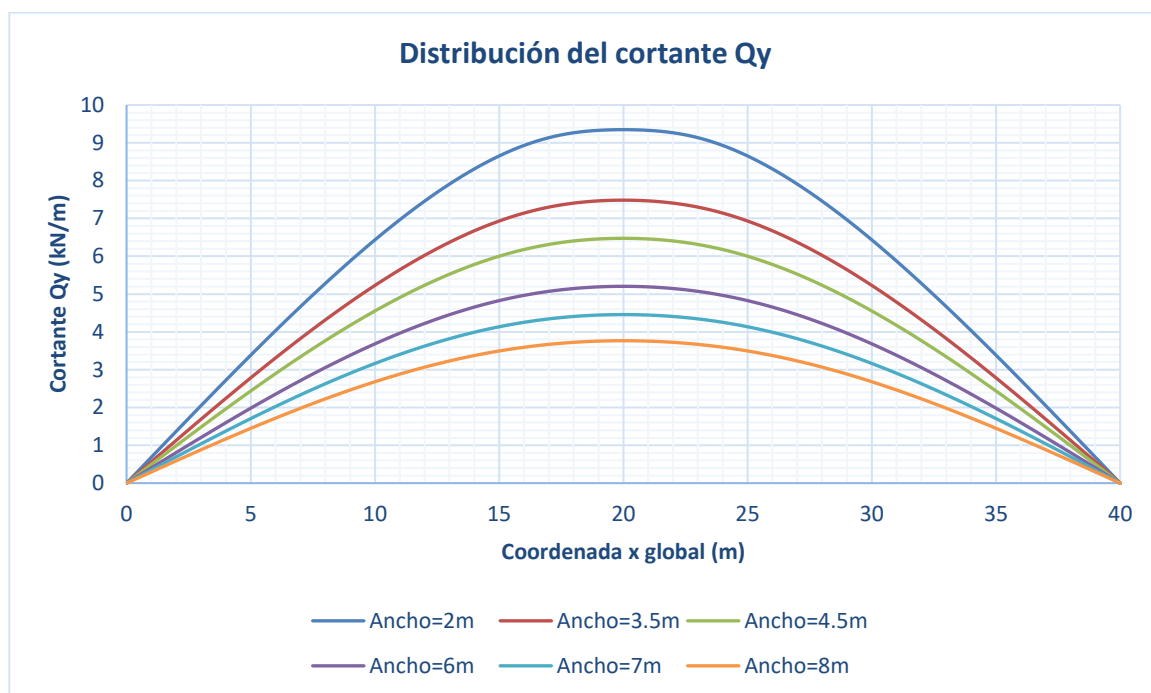


Figura 112: Distribución del momento Q_y para los modelos de 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros de ancho de cajones

En relación al cortante Q_y , en todos los modelos de este caso alcanza su máximo en la sección central, siendo mayor cuanto menor es el ancho de los cajones. Ésta relación es la que se ha representado en la figura 113. Como se indica en el gráfico, la relación cortante Q_y máximo-ancho de los cajones se puede aproximar, con bastante exactitud, con un polinomio de orden dos.

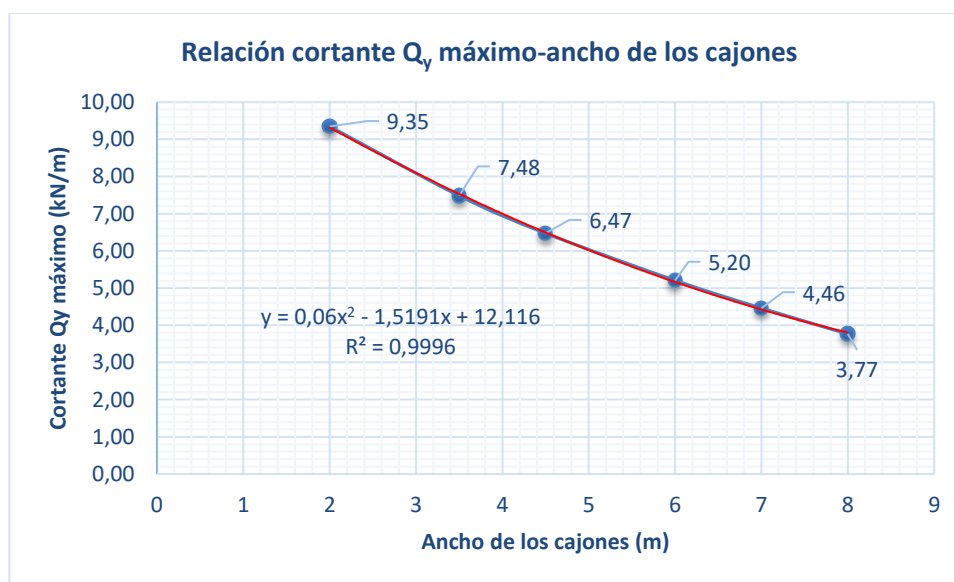


Figura 113: Relación cortante Q_y máximo-ancho de los cajones

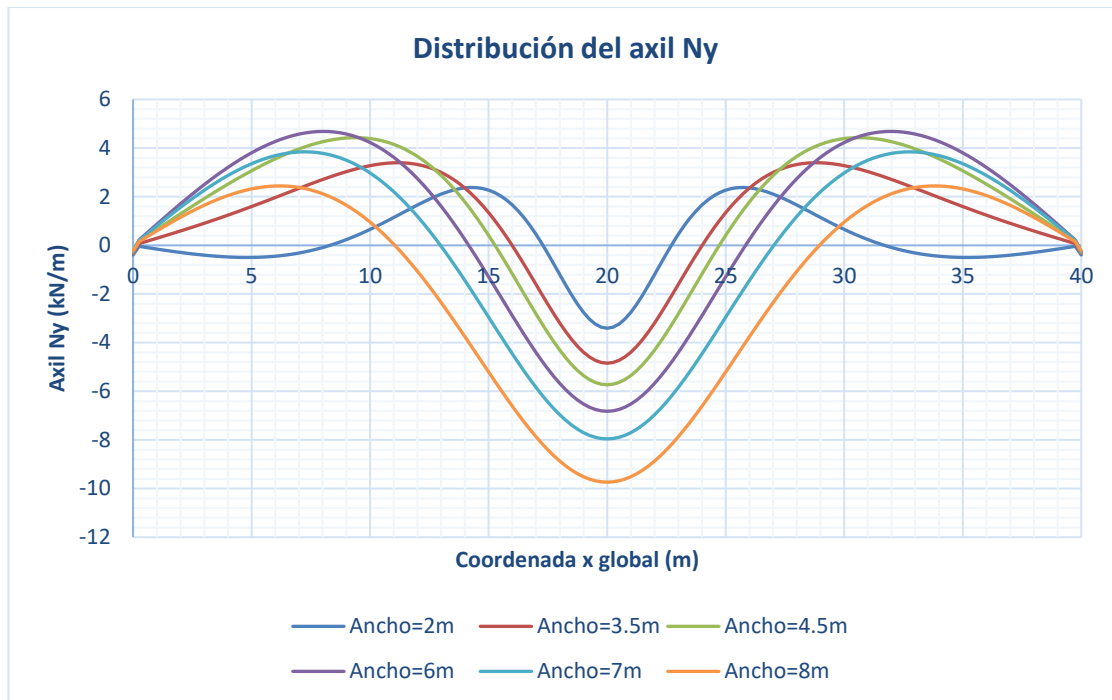


Figura 114: Distribución del momento N_y para los modelos de 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros de ancho de cajones

En la figura 114 se ha representado la distribución del axil N_y para los modelos que se indicaron al comienzo de este apartado. En todos los modelos se alcanza el valor máximo en el centro del vano, siendo dicho valor mayor cuanto más se incrementa el ancho del cajón.

A continuación, se muestra cómo evolucionan los valores máximos, tanto negativos como positivos, del axil N_y al variar el ancho de los cajones. Al aumentar esta longitud, el valor máximo negativo aumenta, alcanzando su máximo para el modelo de 8 metros de separación. Sin embargo, el valor máximo positivo aumenta hasta que el ancho de los cajones es igual a 6 metros, y hasta el modelo de 8 metros de ancho, vuelve a disminuir, teniendo prácticamente el mismo valor que se da en el modelo con cajones de 2 metros de ancho.

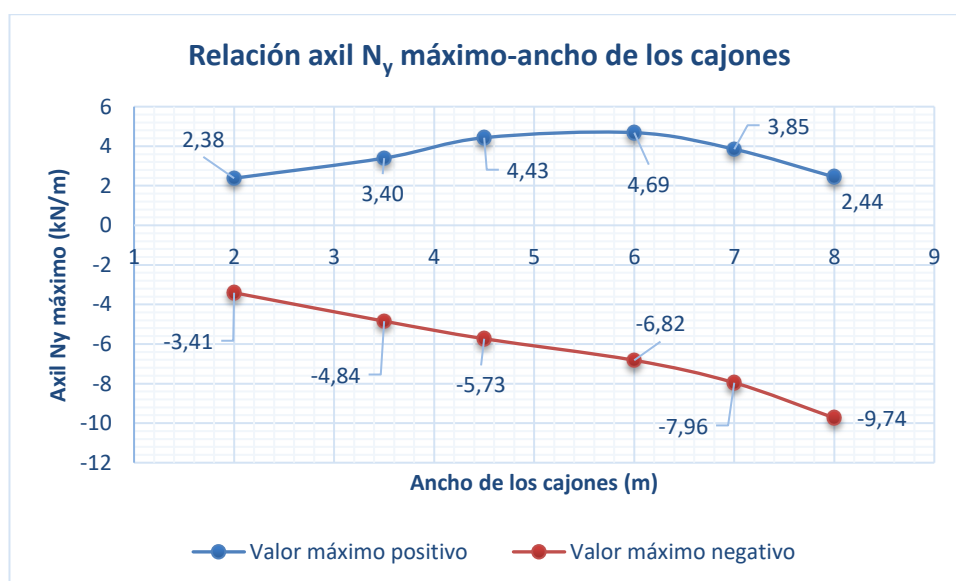


Figura 115: Relación axil N_y máximo-ancho de los cajones

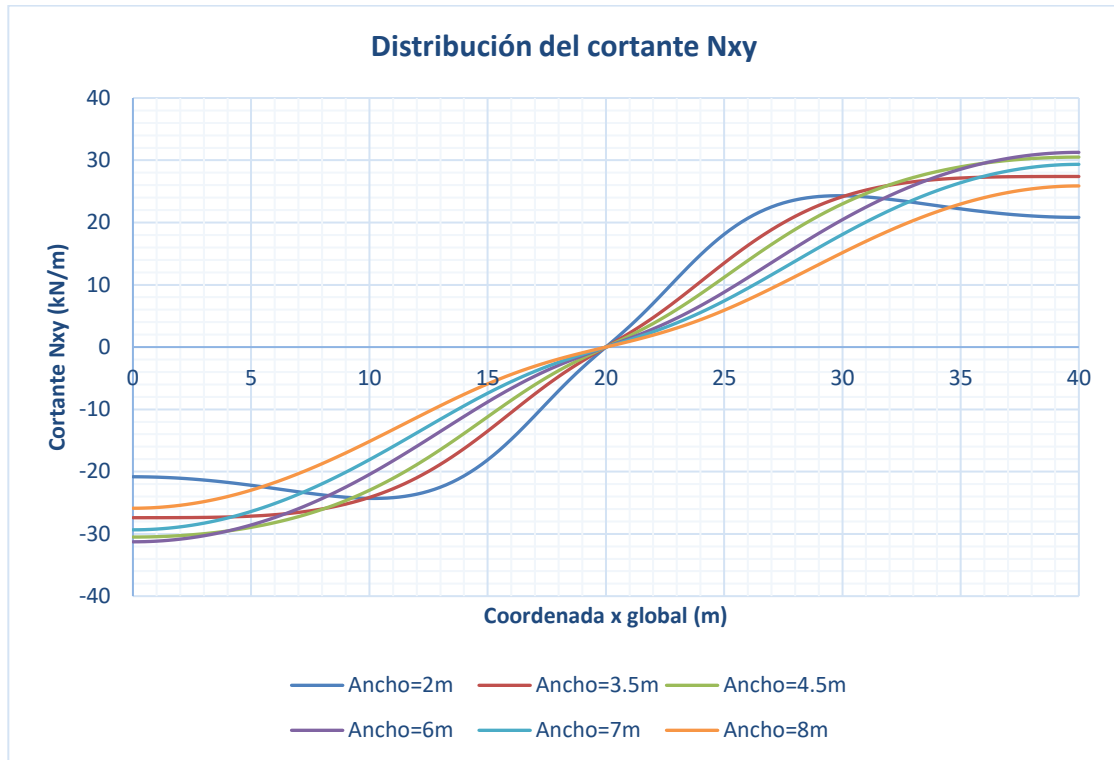


Figura 116: Distribución del momento N_{xy} para los modelos de 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros de ancho de cajones

Por último, en la figura 116 se representa el cortante N_{xy} . Como se puede observar, al disminuir el ancho del cajón, el valor de N_{xy} en los extremos disminuye, y aumenta a medida que se ensancha el cajón. Sin embargo, para un ancho de cajón igual a 7 metros, vuelve a disminuir dicho valor del cortante N_{xy} . Además, la pendiente de la distribución del cortante en la zona central tiende a suavizarse al aumentar el ancho de cajón.

Como se observa en la figura 117, de la misma forma que ocurría con la evolución del axil N_y máximo positivo, el cortante máximo N_{xy} se obtiene en el modelo con cajones de 6 metros de ancho.

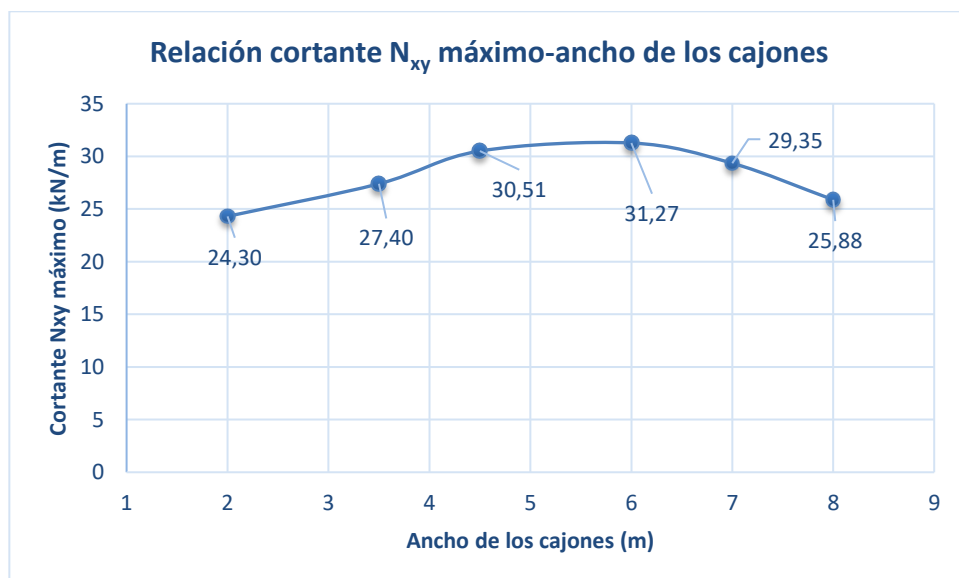


Figura 117: Relación cortante N_{xy} máximo-ancho de los cajones

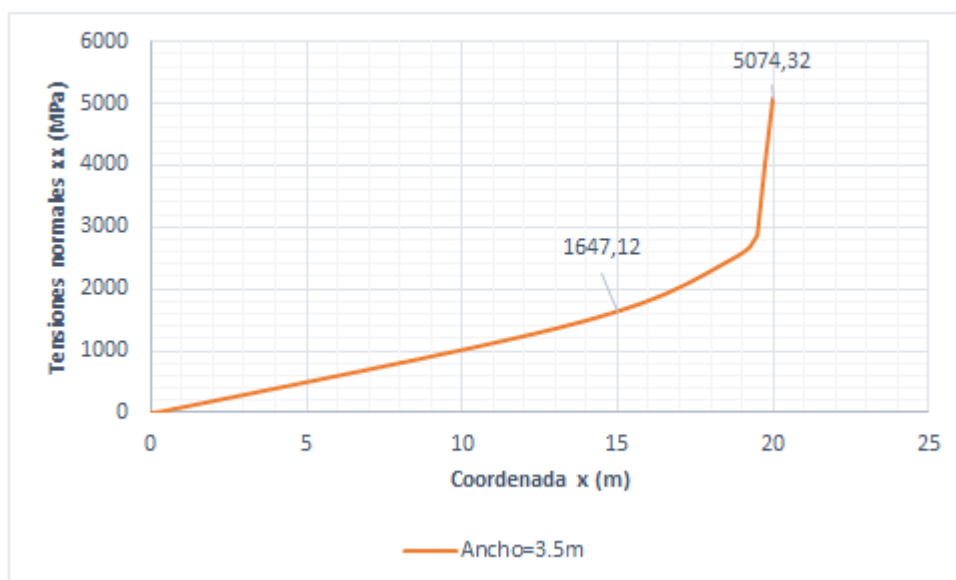
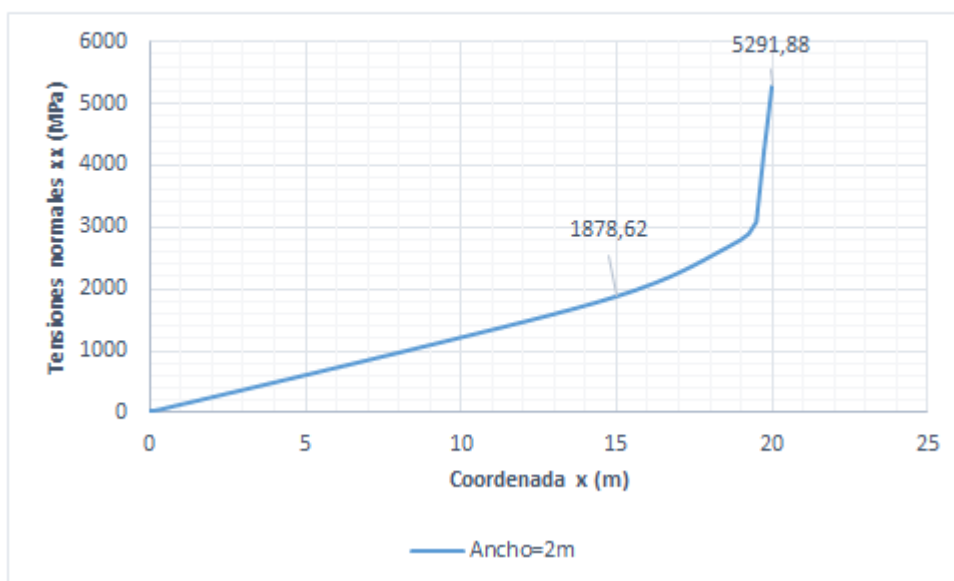
4.3.2.4 Tensiones

De la misma forma que en los casos anteriores, en el presente apartado expondremos la distribución de tensiones obtenidas de los mismos modelos que en el apartado anterior han sido utilizados para el estudio de los esfuerzos.

4.3.2.4.1 Tensiones normales

Al igual que ocurría en el caso 2 (variación de la inclinación de las almas), la distribución de las tensiones normales en el nudo 2 son similares en todos los modelos estudiados. Por ello, se ha decidido representar los resultados en gráficas diferentes, donde se han señalado los valores máximos alcanzados (en la sección central en todos los modelos) y el valor en la sección $x=15\text{m}$.

Distribución de las tensiones normales en el nudo 2 a lo largo de la luz



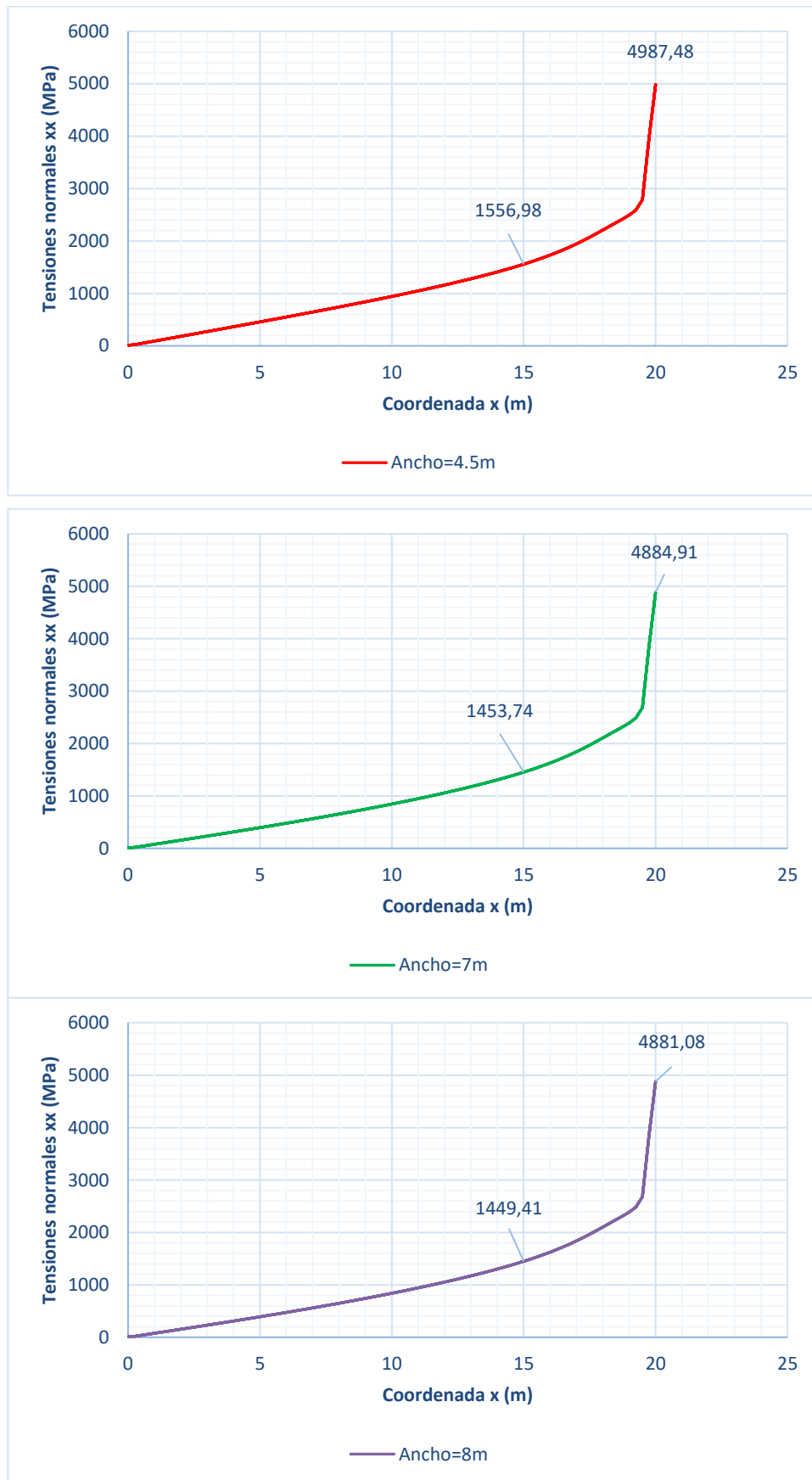


Figura 118: Distribución de σ_{xx} (MPa) en el nudo 2 a lo largo de la luz de los modelos de ancho 2, 3.5, 4.5, 7 y 8 metros

Como se ha mencionado anteriormente, en la figura 118 se puede ver que la máxima tensión normal en el nudo 2 se alcanza, en todos los modelos, en la sección del centro del vano. Dicha tensión disminuye al

aumentar el ancho de los cajones, al igual que las tensiones en el resto de la luz.

En el nudo 3 (figura 119), las tensiones normales son mayores cuanto menor es el ancho del cajón, al igual que las tensiones en el nudo 2. Sin embargo, al alcanzar los 7 metros de ancho, se produce una pequeña disminución de las tensiones, y vuelven a crecer al seguir aumentando el ancho de los cajones. Esta evolución de las tensiones es la que se muestra en la figura 122.

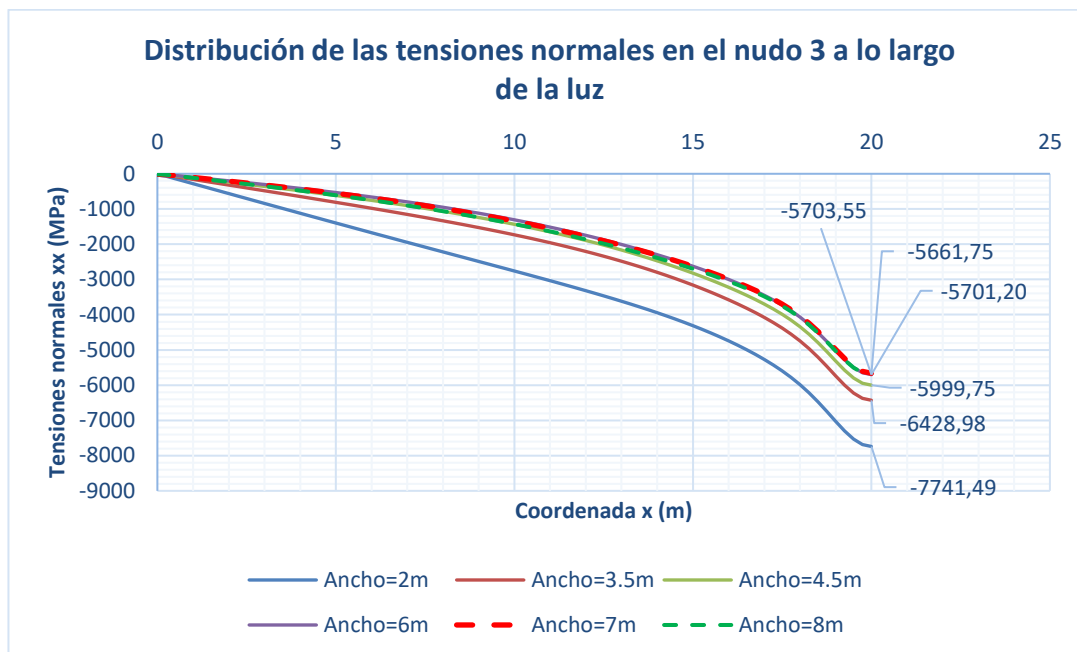


Figura 119: Distribución de σ_{xx} (MPa) en el nudo 3 a lo largo de la luz de los modelos de ancho 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros

Las tensiones normales en el nudo 5, como se puede observar en la figura 120, alcanzan mayores valores cuando el ancho de los cajones es menor. Además, la pendiente que tiene la distribución de estas tensiones hasta llegar al centro del vano, se suaviza al aumentar la anchura del cajón.

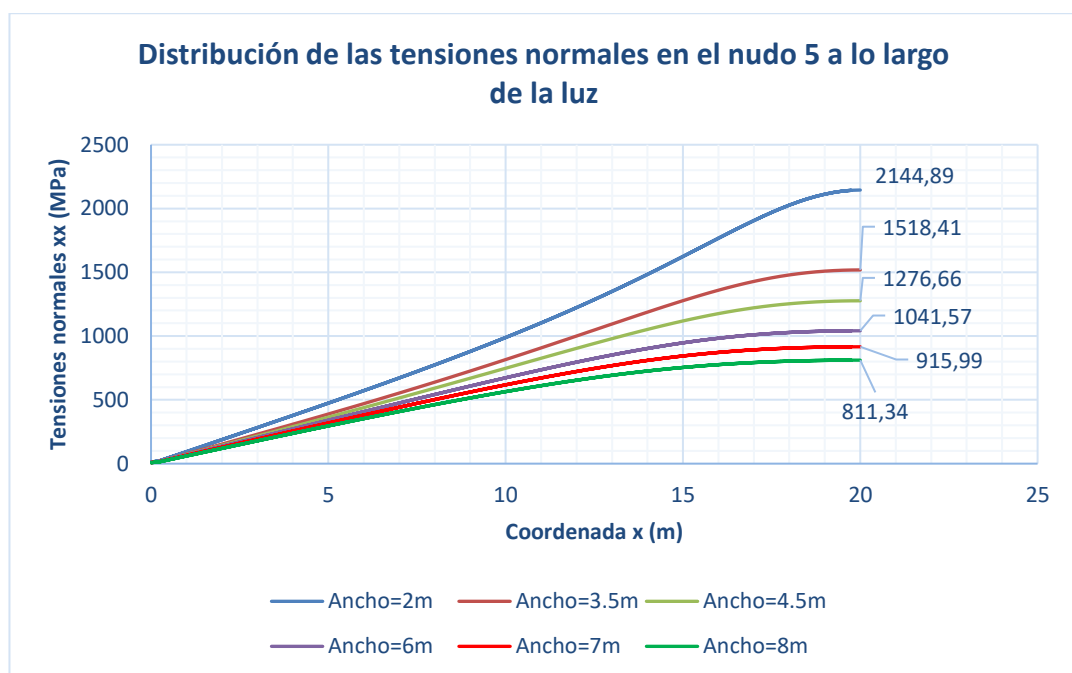


Figura 120: Distribución de σ_{xx} (MPa) en el nudo 5 a lo largo de la luz de los modelos de ancho 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros

Por último, se muestran las tensiones normales en el nudo 6. Del mismo modo que las tensiones en el nudo 5, las tensiones normales disminuyen al aumentar el ancho de los cajones en el nudo 6. Además, se aprecia que a medida que aumenta el ancho, la distribución de tensiones tiene un tramo pseudoconstante de mayor longitud.

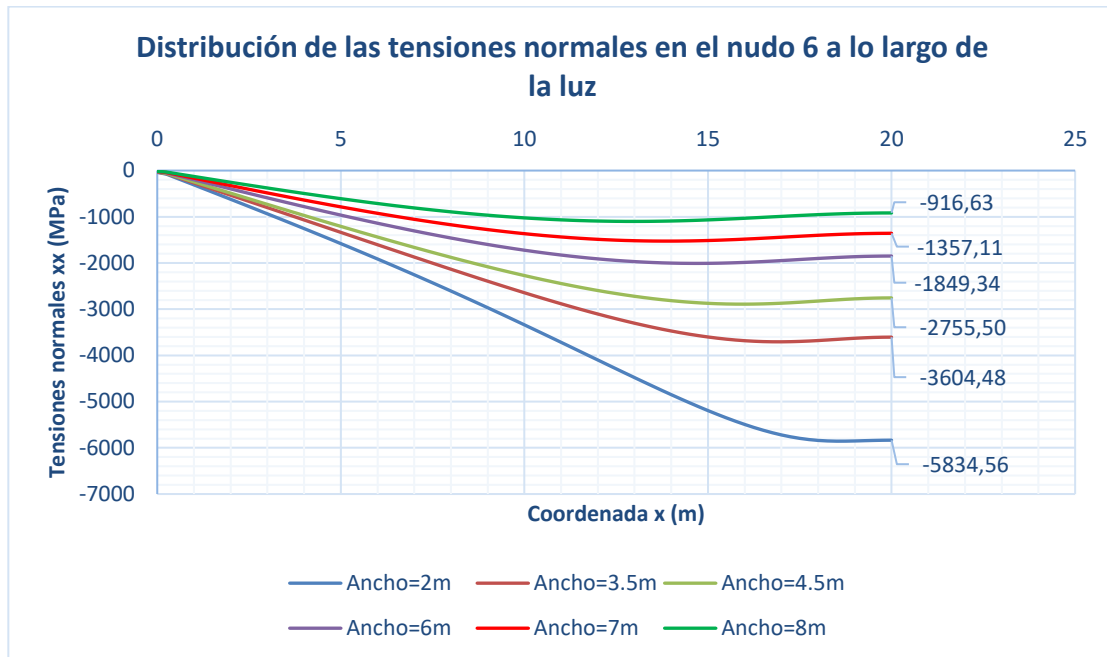


Figura 121: Distribución de σ_{xx} (MPa) en el nudo 6 a lo largo de la luz de los modelos de ancho 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros

Como se observa en la siguiente gráfica (figura 122), las tensiones normales en el nudo 2 (punto de aplicación de la carga) son a las que menos afecta la variación del ancho de los cajones. En el resto de nudos estudiados, la influencia es mayor. Las tensiones en el nudo 5 sufren una disminución importante al aumentar el ancho de los cajones, al igual que ocurre en los nudos 3 y 6, siendo en estos nudos las tensiones de tracción, y de compresión en los otros dos.

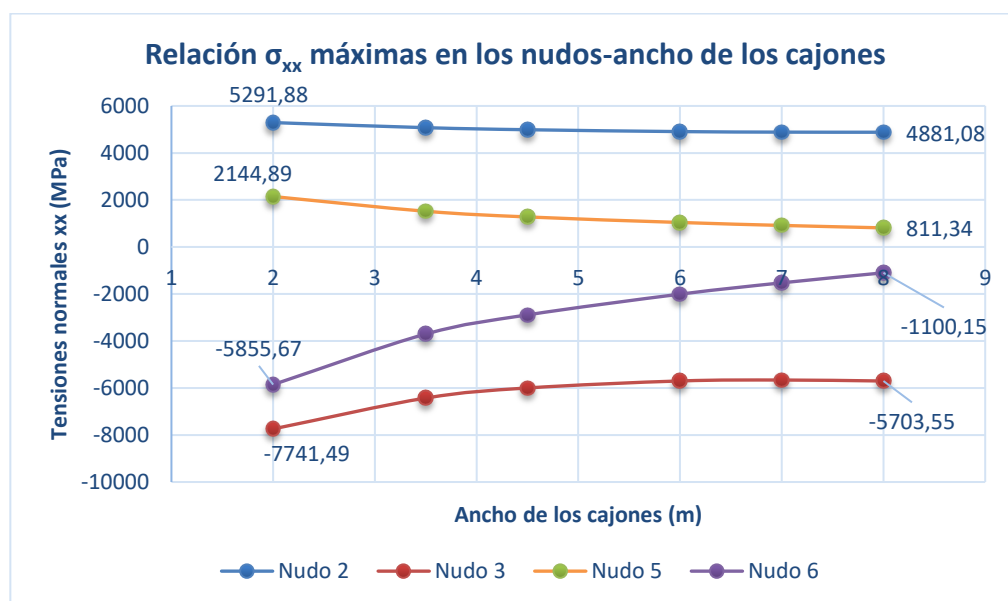


Figura 122: Relación σ_{xx} máximas en los nudos-ancho de los cajones

A continuación, se muestran las tensiones normales en las secciones $x=20\text{m}$ y $x=15\text{m}$ (al igual que en el estudio de D. Javier Manterola) para los modelos de 2 y 8 metros de ancho de cajón. Se han escogido los modelos de menor y mayor anchura, respectivamente, para ver los valores mínimos y máximos que se alcanzan en el caso 3.

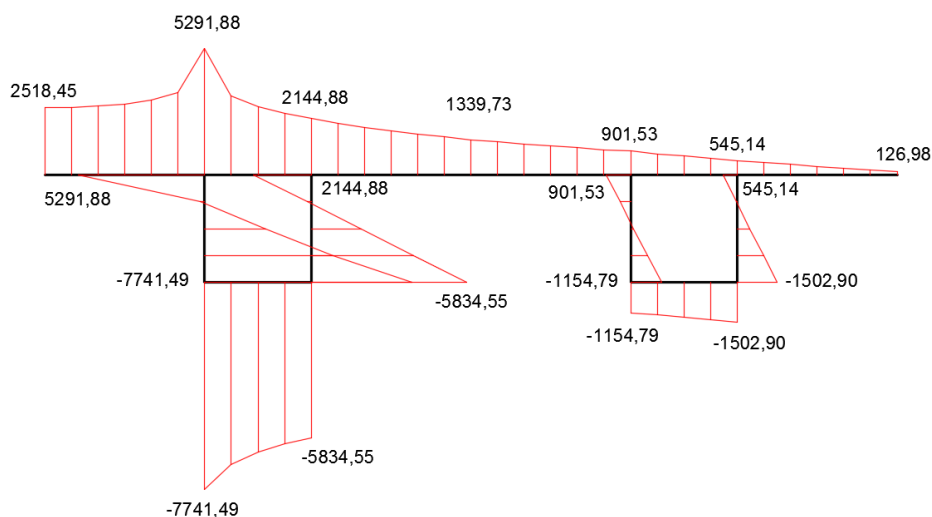


Figura 123: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=20\text{ m}$, del modelo con 2 metros de ancho de cajón

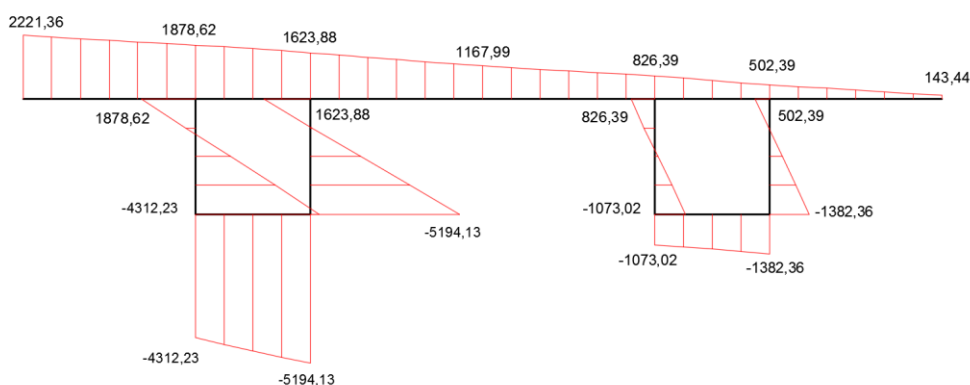


Figura 124: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=15\text{ m}$, del modelo con 2 metros de ancho de cajón

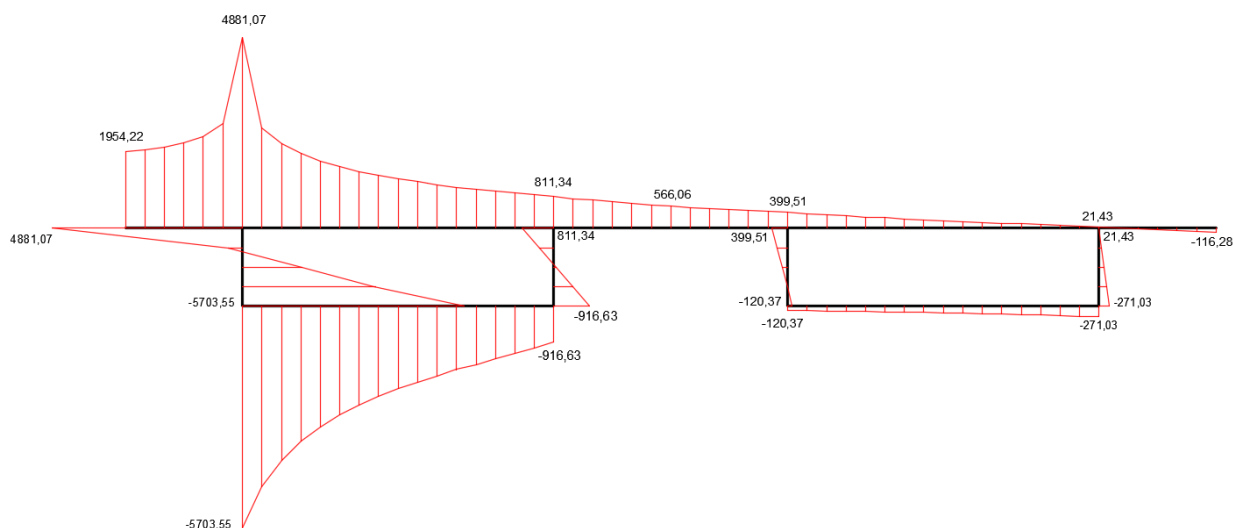


Figura 125: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=20\text{ m}$, del modelo con 8 metros de ancho de cajón

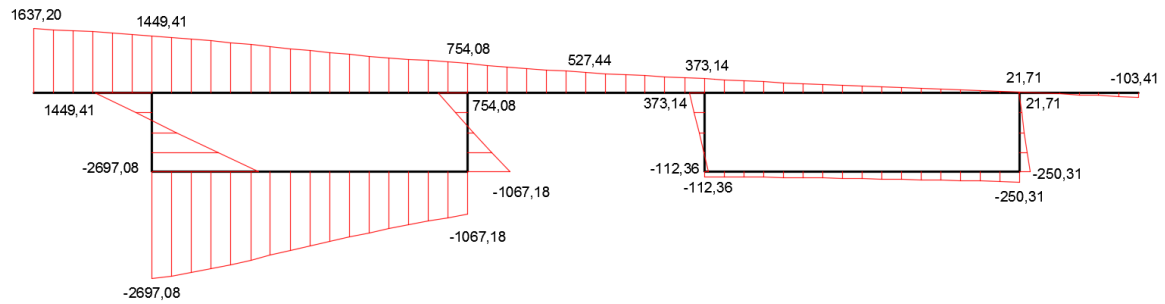


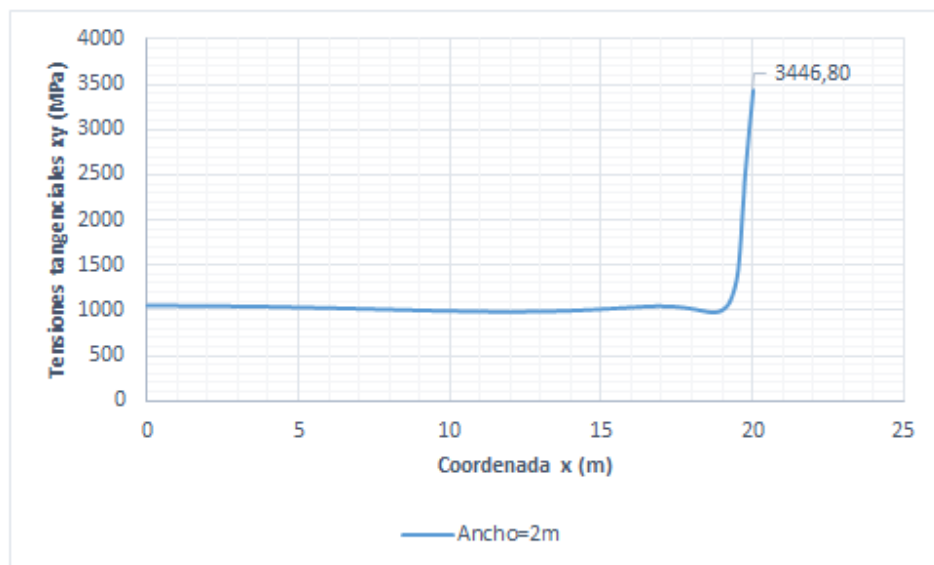
Figura 126: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=15$ m, del modelo con 8 metros de ancho de cajón

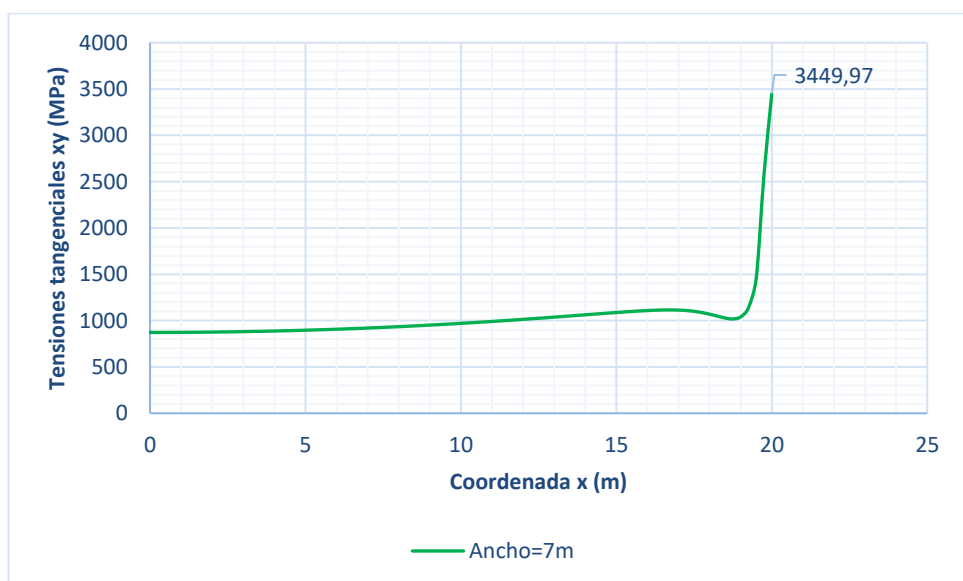
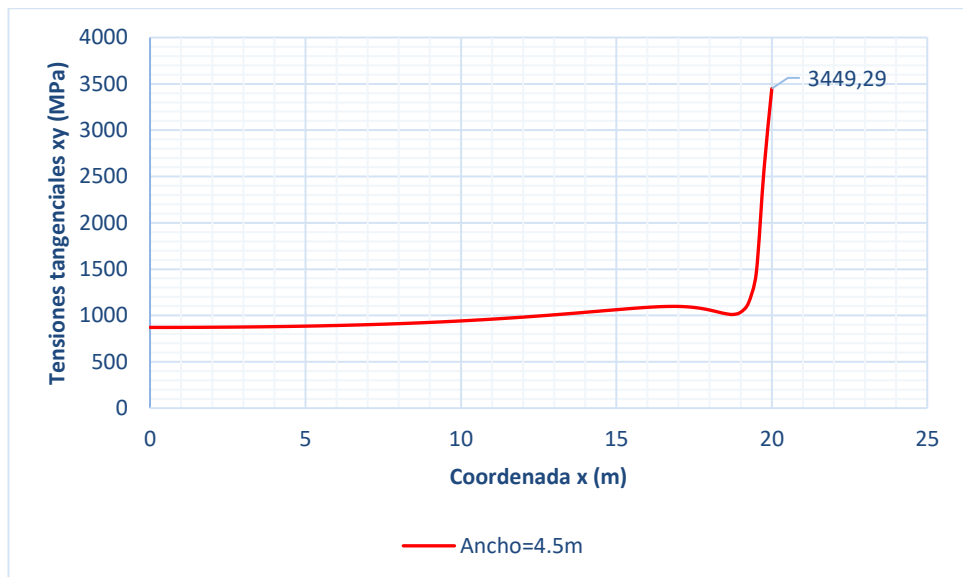
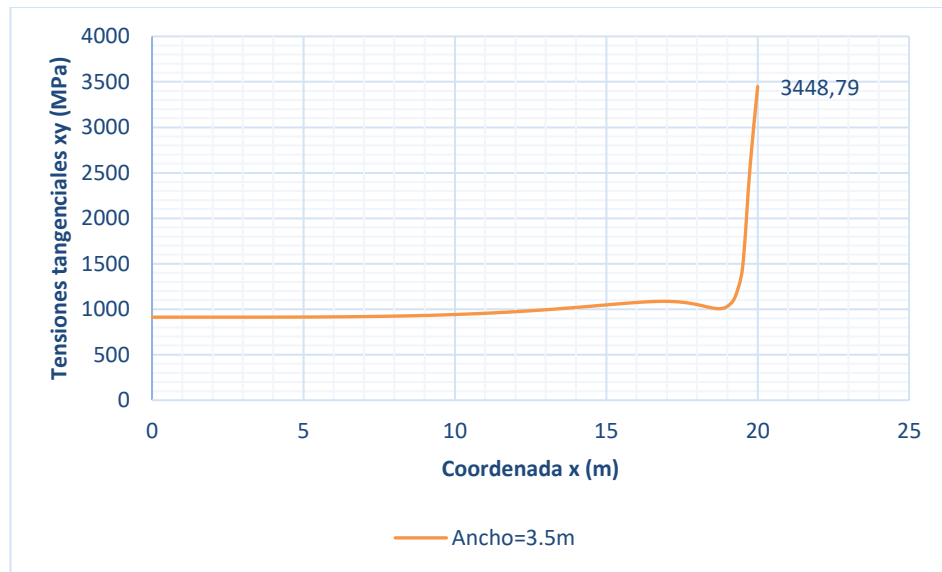
4.3.2.4.2 Tensiones tangenciales

Como se ha hecho en los anteriores casos, en este apartado se muestran los resultados obtenidos para las tensiones tangenciales, tanto en los nudos 2, 3, 5 y 6, como en las secciones $x=19.5$ m y $x=10$ m de los modelos de 2 y 8 metros de ancho de cajón.

Al igual que ocurriría con las tensiones normales en el nudo 2, la variación del ancho de los cajones tiene una influencia mínima en las tensiones tangenciales en dicho nudo, de ahí que se hayan representado los modelos en gráficas separadas.

Distribución de las tensiones tangenciales en el nudo 2 a lo largo de la luz





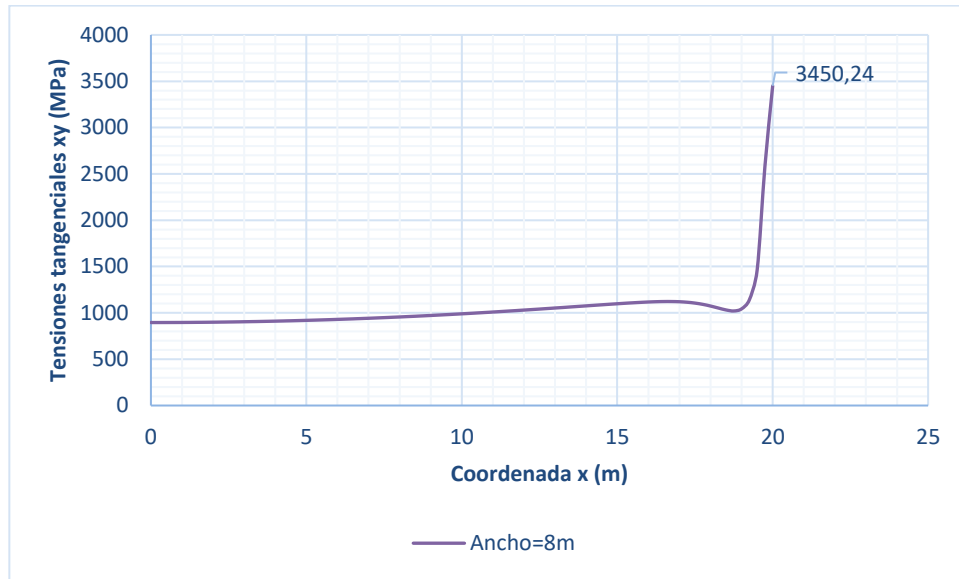


Figura 127: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 2, a lo largo de la luz, para los modelos de ancho 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros

En la figura 128 se representa la tensión tangencial en el nudo 3 a lo largo de la luz del puente. Como se observa, la variación entre los modelos es mínima, siendo el valor prácticamente el mismo en la sección central.

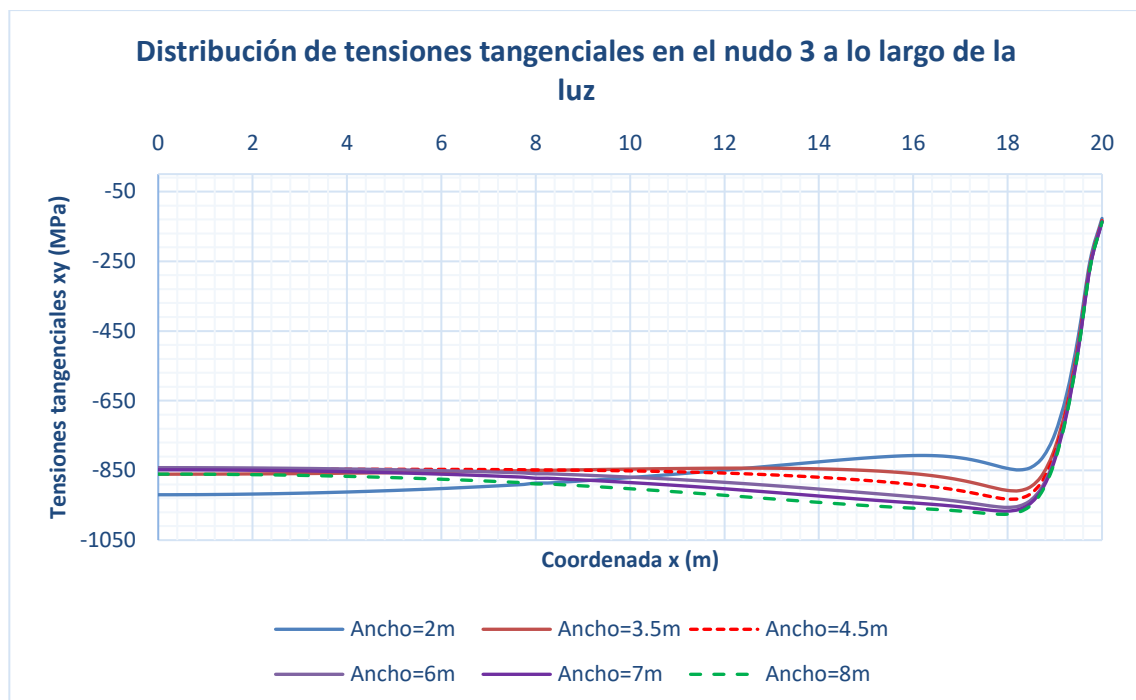


Figura 128: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 3, a lo largo de la luz, para los modelos de ancho 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros

Las tensiones tangenciales en los nudos 5 y 6 sufren una mayor variación con el cambio del ancho de los cajones, ya que supone un acercamiento o alejamiento del punto de aplicación de la carga.

En el nudo 5, las tensiones para modelos con menor ancho de cajón tienen un cambio de signo entre la sección del apoyo y la sección central, mientras que, para mayores anchos, la distribución de tensiones tangenciales tiene el cambio de signo en la sección central.

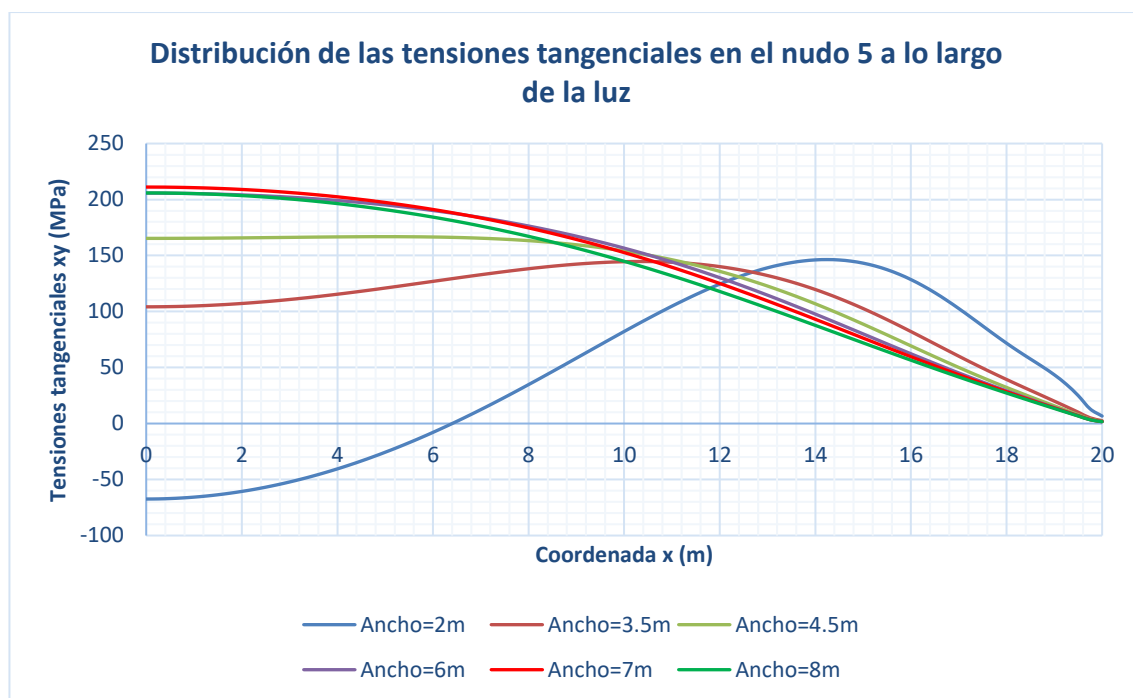


Figura 129: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 5, a lo largo de la luz, para los modelos de ancho 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros

Lo mismo sucede con la distribución de tensiones tangenciales en el nudo 6: para anchos de cajón menores, se observa un cambio de signo en las tensiones antes de alcanzar la sección central. En cambio, para mayores anchos de cajón, no existe tal variación, obteniéndose una distribución casi constante en la zona cercana al apoyo.

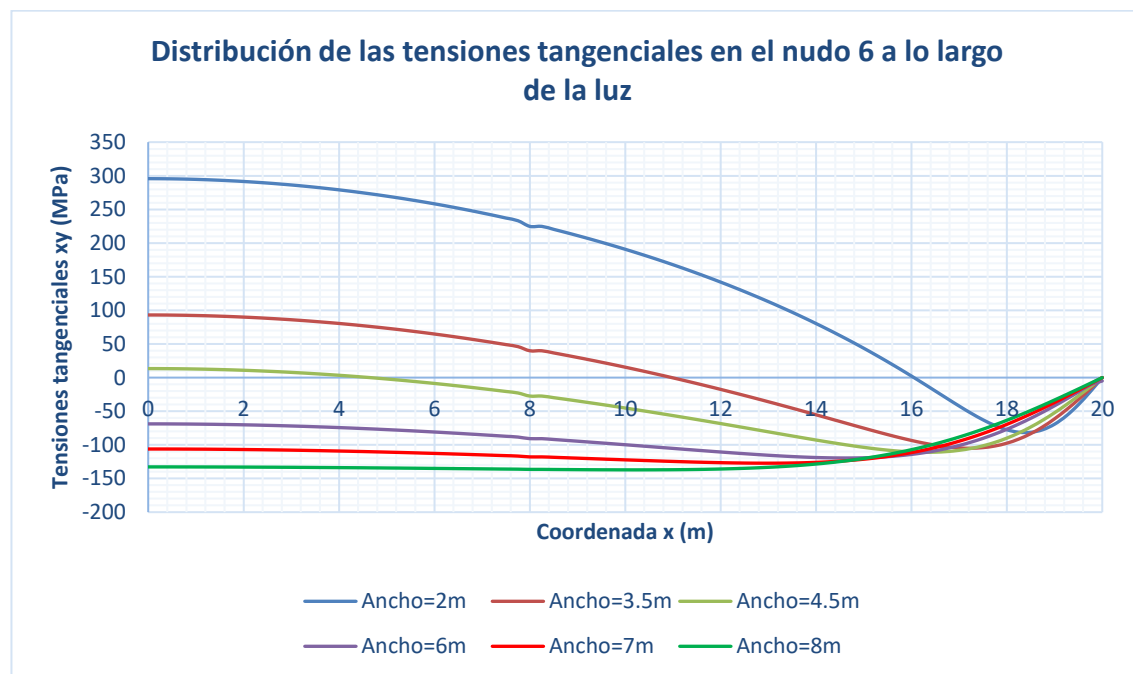


Figura 130: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 6, a lo largo de la luz, para los modelos de ancho 2, 3.5, 4.5, 6, 7 y 8 metros

En la figura 131 se ha representado cómo evolucionan las tensiones tangenciales máximas en las esquinas del cajón izquierdo al aumentar el ancho de los cajones. Salvo en el nudo 6, en el resto la variación del ancho de los cajones no supone una gran influencia en los valores máximos de las tensiones tangenciales.

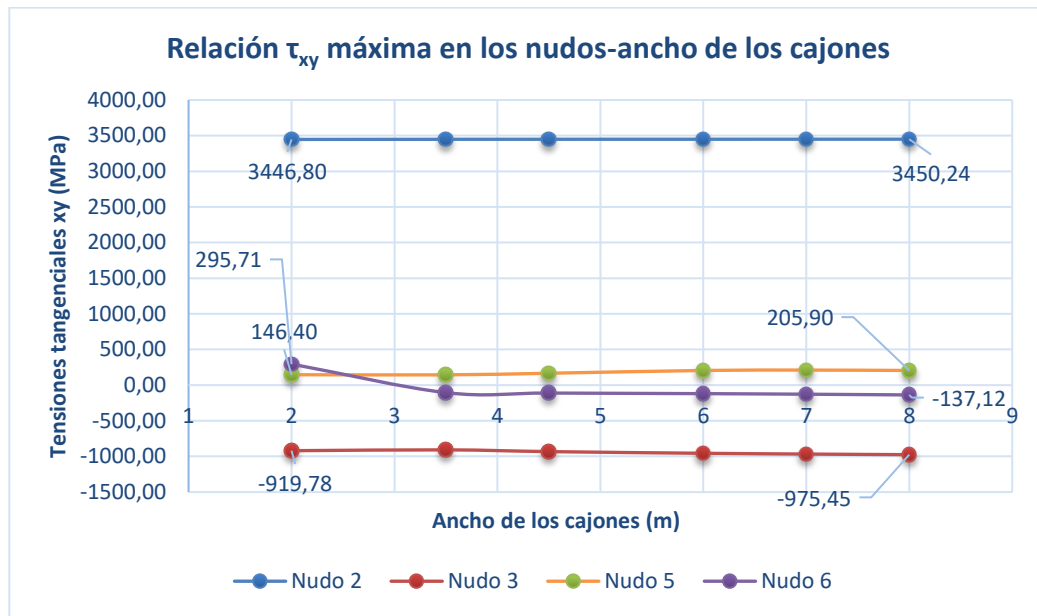


Figura 131: Relación τ_{xy} máxima en los nudos-ancho de los cajones

En último lugar, se muestran las tensiones tangenciales de las secciones $x=10\text{m}$ y $x=19.5\text{m}$ de los modelos de 2 y 8 metros de ancho de cajón.



Figura 132: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=19.5\text{ m}$, del modelo con un ancho de cajón igual a 2 metros

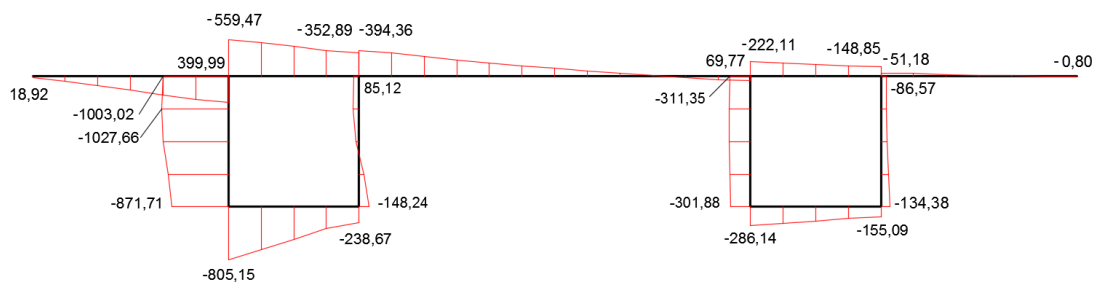


Figura 133: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=10\text{ m}$, del modelo con un ancho de cajón igual a 2 metros

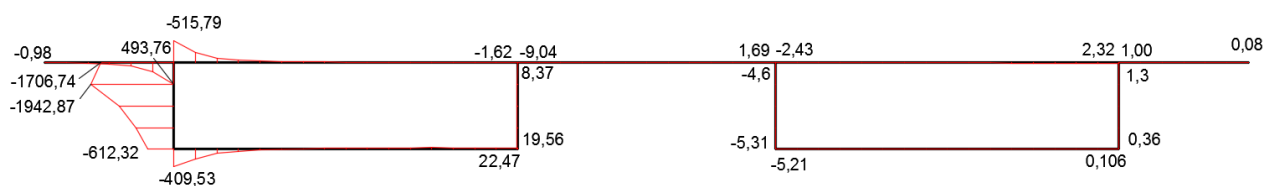


Figura 134: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=19.5$ m, del modelo con un ancho de cajón igual a 8 metros

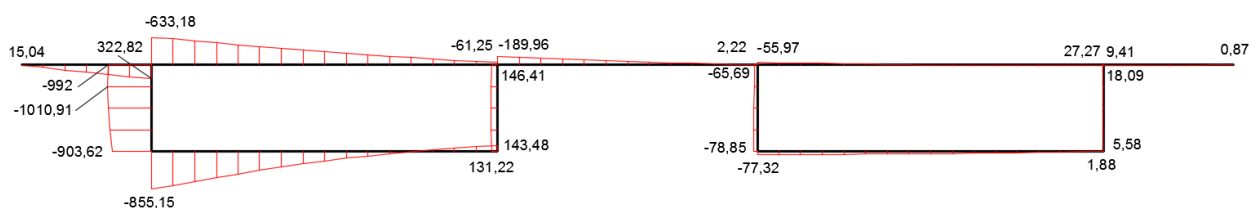


Figura 135: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=10$ m, del modelo con un ancho de cajón igual a 8 metros

4.4 Caso 4: Variación de la separación entre cajones

4.4.1 Descripción del modelo

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos para el último caso estudiado. En él, se han analizado 13 modelos en los que se han ido variando la separación entre los cajones, desde los 2 metros hasta los 8 metros, aumentándose cada medio metro. Por lo tanto, al igual que en el caso 3, la longitud de la losa superior también ha ido cambiando.

4.4.2 Resultados obtenidos en el caso 4

4.4.2.1 Desplazamientos

En las siguientes imágenes se han representado los desplazamientos de los modelos con una separación entre cajones de 2, 2.5, 4, 5, 6.5 y 8 metros. El modelo de 6 metros de separación corresponde al del estudio de D. Javier Manterola, representado en la figura 06.

Como se puede ver, la zona de influencia de la carga es mayor cuanto menor es la separación entre cajones, ya que con esto se disminuye también el ancho de la sección del puente.

La mayor diferencia entre los desplazamientos de los distintos modelos se encuentra en el cajón derecho, los cuales disminuyen considerablemente al aumentar la distancia entre cajones.

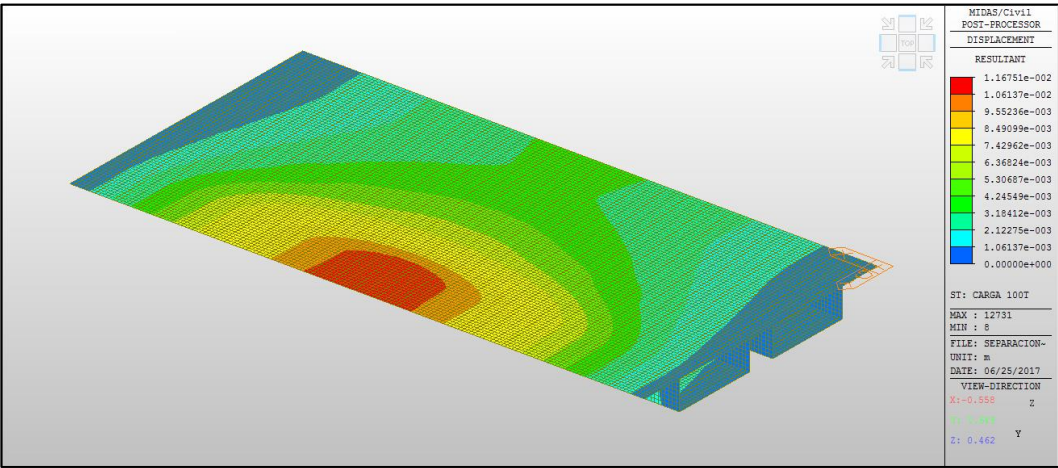


Figura 136: Desplazamientos (m) del modelo de 2 metros de separación entre cajones

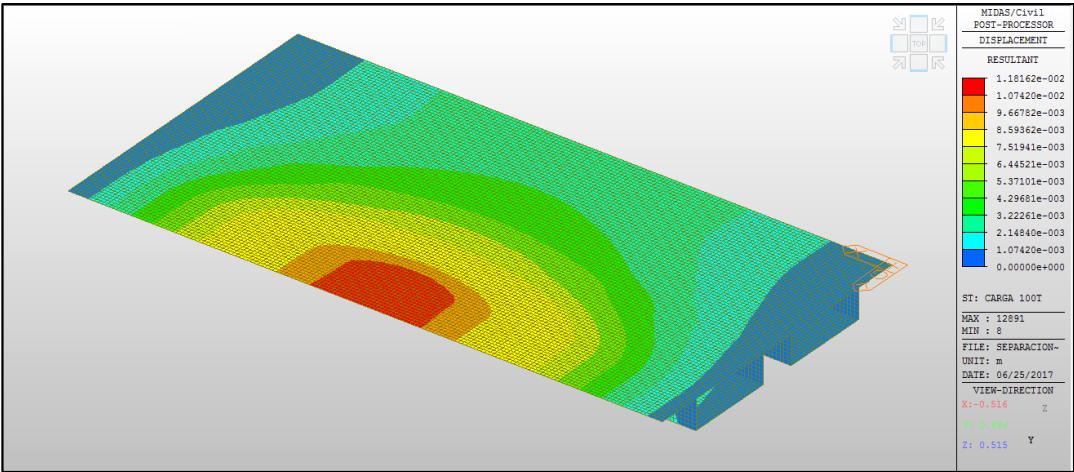


Figura 137: Desplazamientos (m) del modelo de 2.5 metros de separación entre cajones

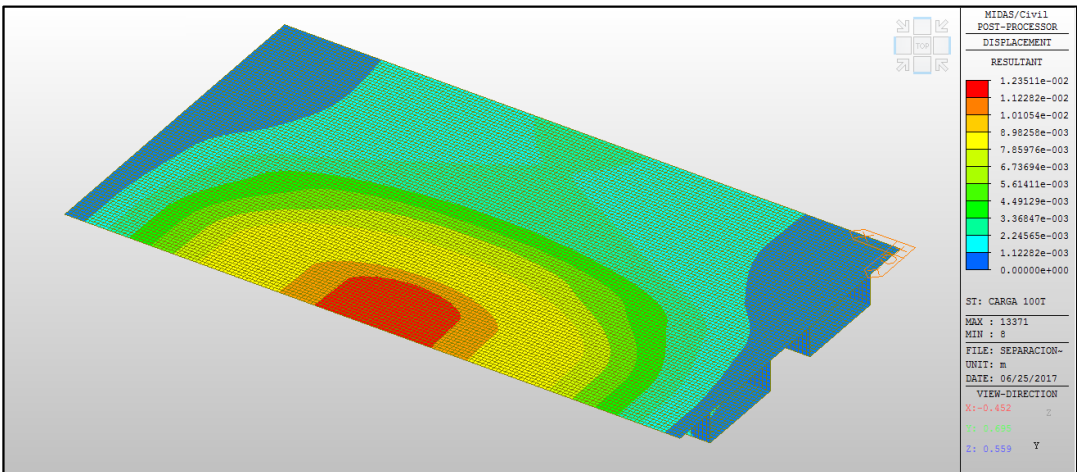


Figura 138: Desplazamientos (m) del modelo de 4 metros de separación entre cajones

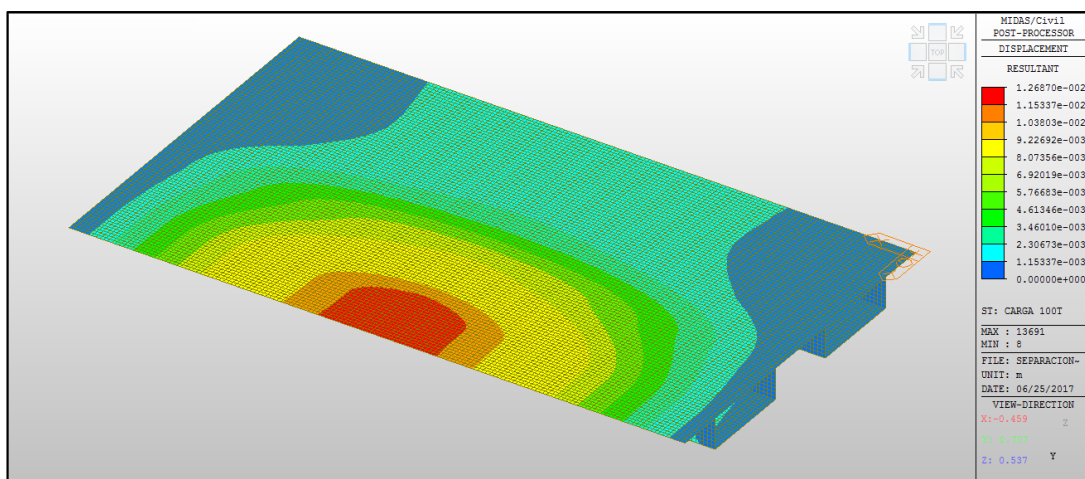


Figura 139: Desplazamientos (m) del modelo de 5 metros de separación entre cajones

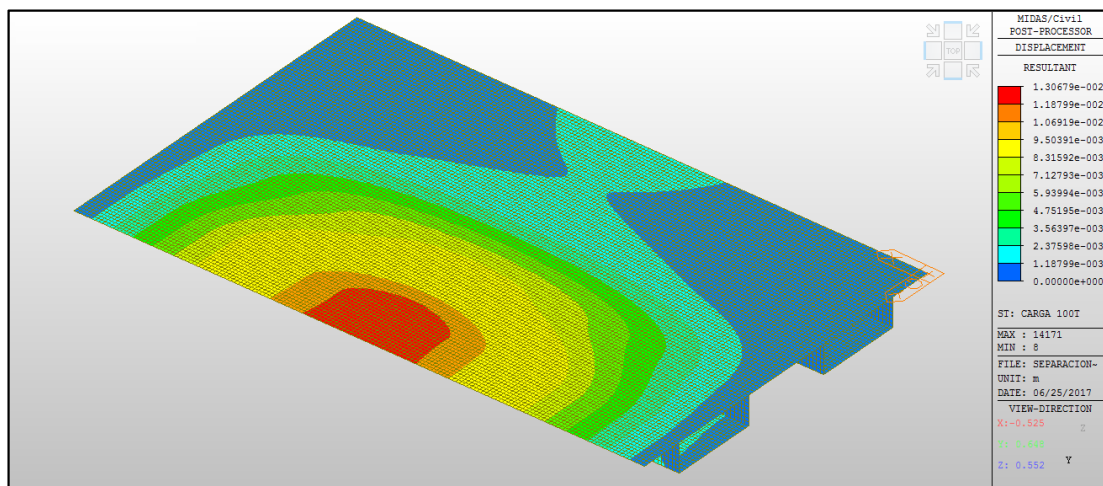


Figura 140: Desplazamientos (m) del modelo de 6.5 metros de separación entre cajones

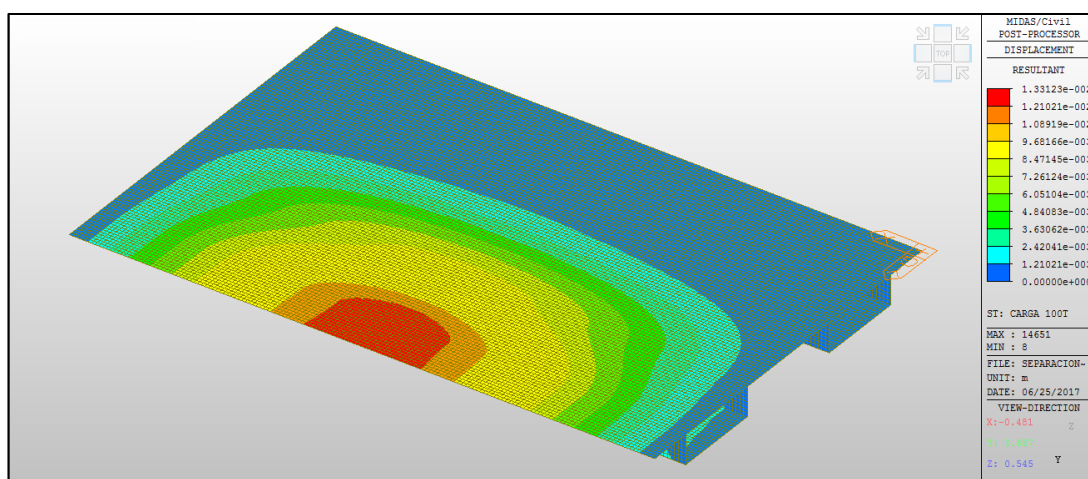


Figura 141: Desplazamientos (m) del modelo de 8 metros de separación entre cajones

Las siguientes gráficas (figura 142 y 143) recogen cómo varía la flecha (desplazamiento vertical) de los nudos 2, 3, 5 y 6 (cajón izquierdo) y de los nudos 8, 9, 11 y 12 (cajón derecho) al modificar la separación entre cajones.

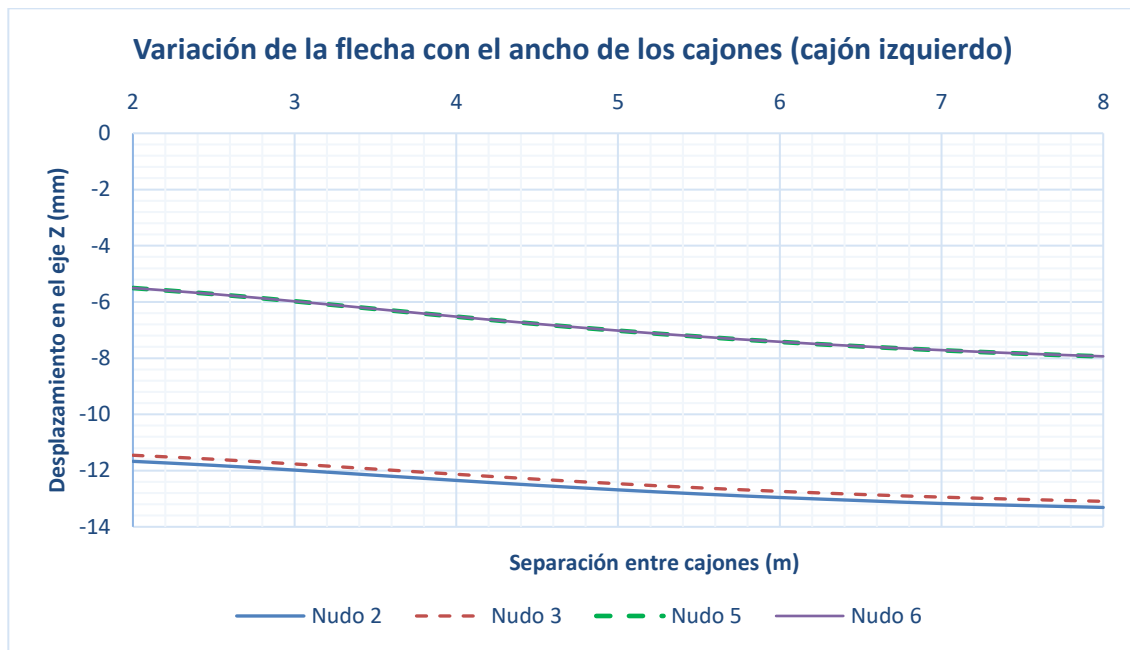


Figura 142: Variación de la flecha con la separación entre cajones (cajón izquierdo)

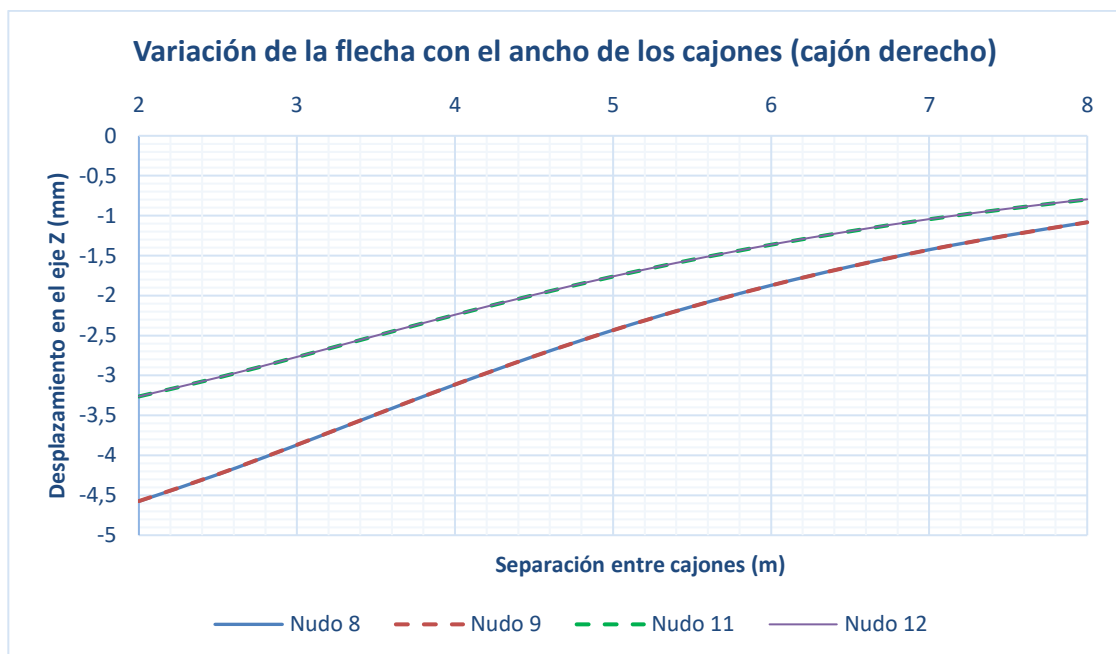


Figura 143: Variación de la flecha con la separación entre cajones (cajón derecho)

Mientras que en el cajón izquierdo la diferencia entre los desplazamientos de las almas se mantiene aproximadamente constante, en el cajón derecho esta diferencia se hace menor con el aumento de la separación entre cajones. Además, como en el resto de modelos, los desplazamientos verticales son mayores en el cajón cargado (cajón izquierdo) que en el cajón derecho.

La relación entre la flecha máxima y la separación entre cajones se representa en la figura 144. Al aumentar la distancia entre los cajones, se produce un aumento de la flecha, y esta evolución puede ser aproximada por un polinomio de orden dos con suficiente precisión.

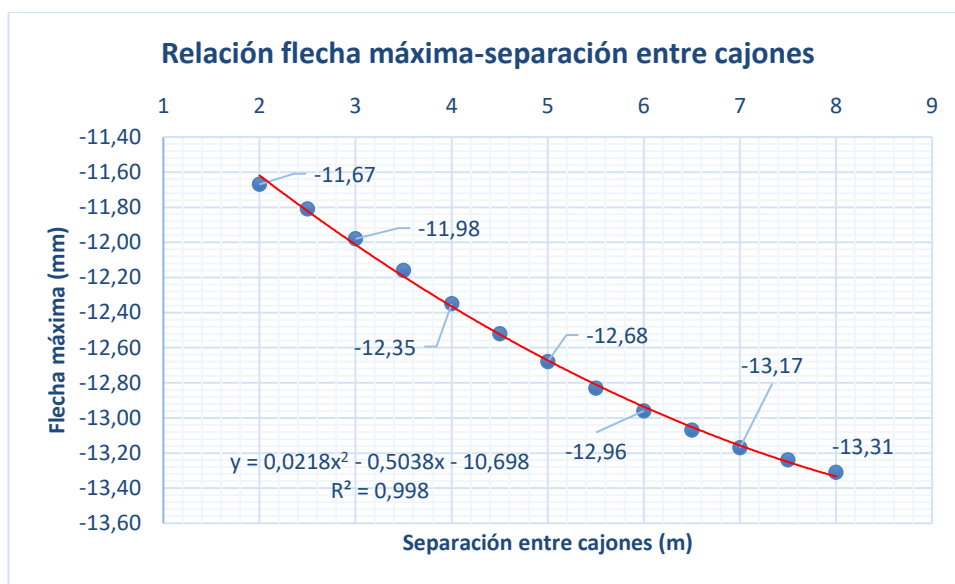


Figura 144: Relación flecha máxima-separación entre cajones

4.4.2.2 Distorsión

La distorsión se ha calculado para la sección central, ya que es la que más deformación sufre y, por lo tanto, es la más representativa.

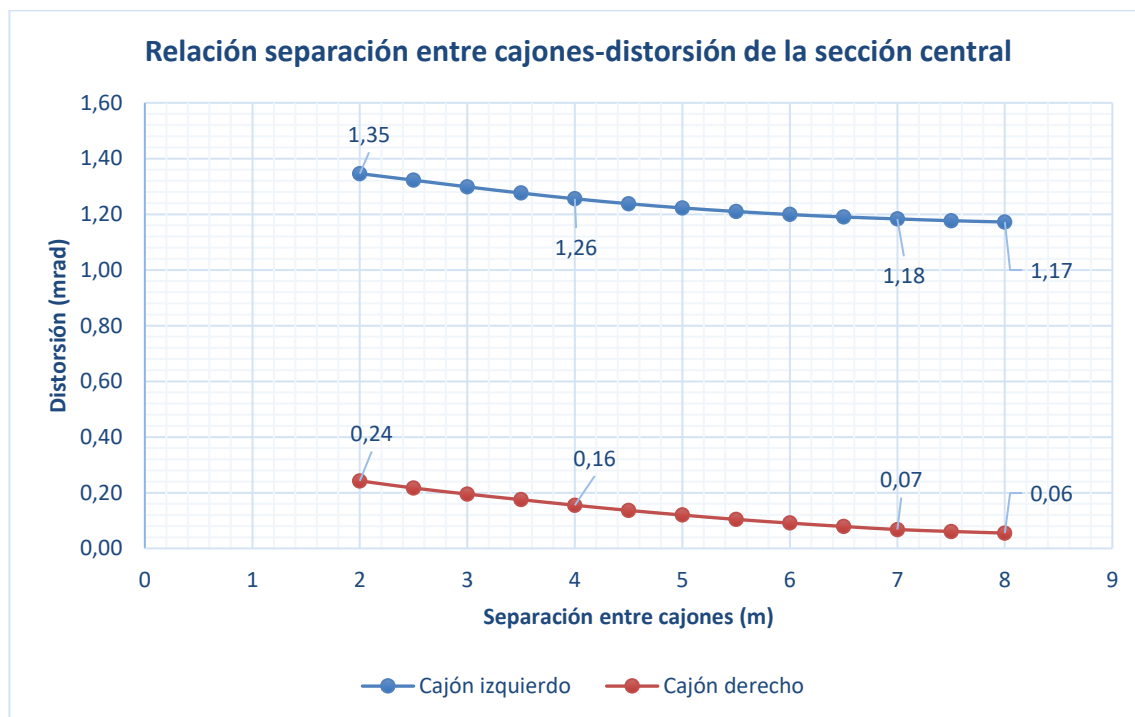


Figura 145: Relación separación entre cajones-distorsión de la sección central

Como se puede observar en la figura 145, al aumentar la separación entre cajones, disminuye la distorsión de los mismos, siendo siempre mayor la distorsión del cajón izquierdo que la del derecho. Además, como se puede apreciar en la gráfica, la diferencia entre los valores de la distorsión de ambos cajones se mantiene aproximadamente constante.

4.4.2.3 Esfuerzos

En este apartado se han expuesto la distribución de los esfuerzos para los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación. Como ocurría en los casos anteriores, los modelos que no se han representado son casos intermedios, por lo que se han omitido para mostrar las gráficas con mayor claridad.

En la figura 146 se muestra la distribución de los momentos flectores M_y , los cuales disminuyen al aumentar la separación entre los cajones. Para una separación inferior a 4 metros, se puede ver en la gráfica que aparece un tramo más o menos constante en la zona central del vano, dándose el valor máximo siempre en la sección central. Al igual que en el estudio de D. Javier Manterola, estos esfuerzos son los de menor cuantía en todos los modelos.

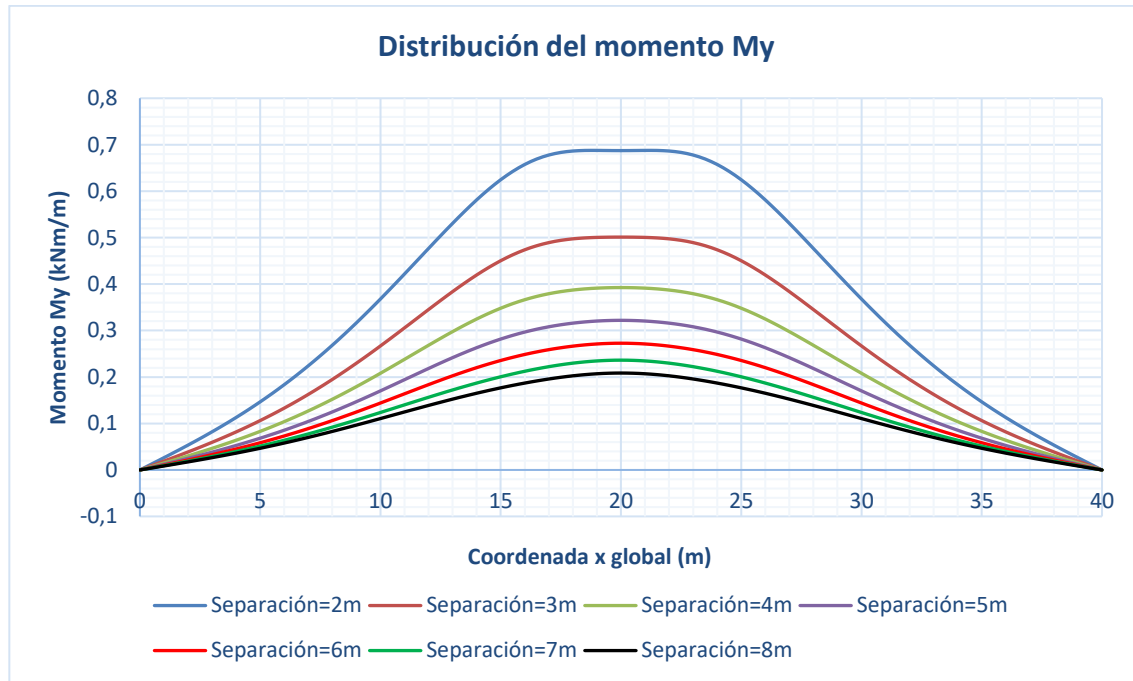


Figura 146: Distribución del momento M_y para los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones

De la misma forma, los esfuerzos cortantes Q_y (figura 147) aumentan de valor a medida que se disminuye la separación entre cajones, y el valor máximo se obtiene en la sección central en cada uno de los modelos estudiados. Esta evolución es la que se ha representado en la figura 149, donde se puede ver la gran influencia de la separación entre cajones en el valor de este esfuerzo, el cual disminuye desde los 13,77 kN/m para una separación de 2 metros, hasta los 3 kN/m, en el modelo de 8 metros de separación entre cajones.

Además, se puede aproximar la función que relaciona el valor máximo de Q_y y la separación entre cajones con una función de orden dos.

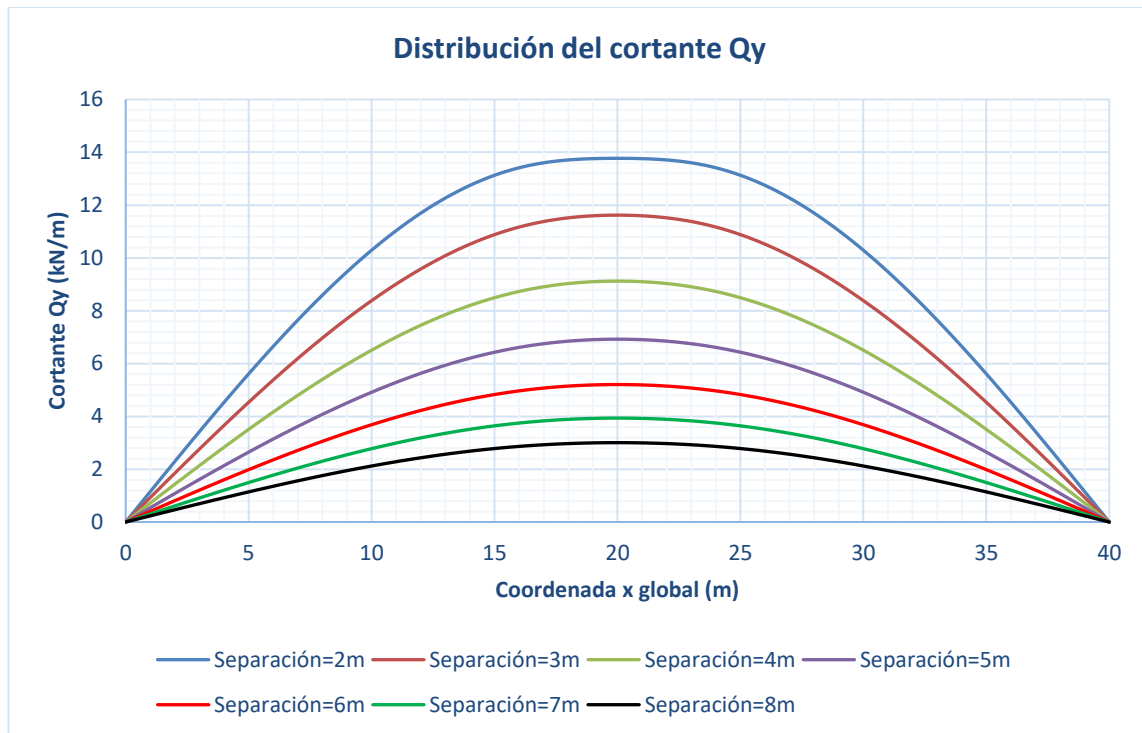


Figura 147: Distribución del momento Q_y para los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones

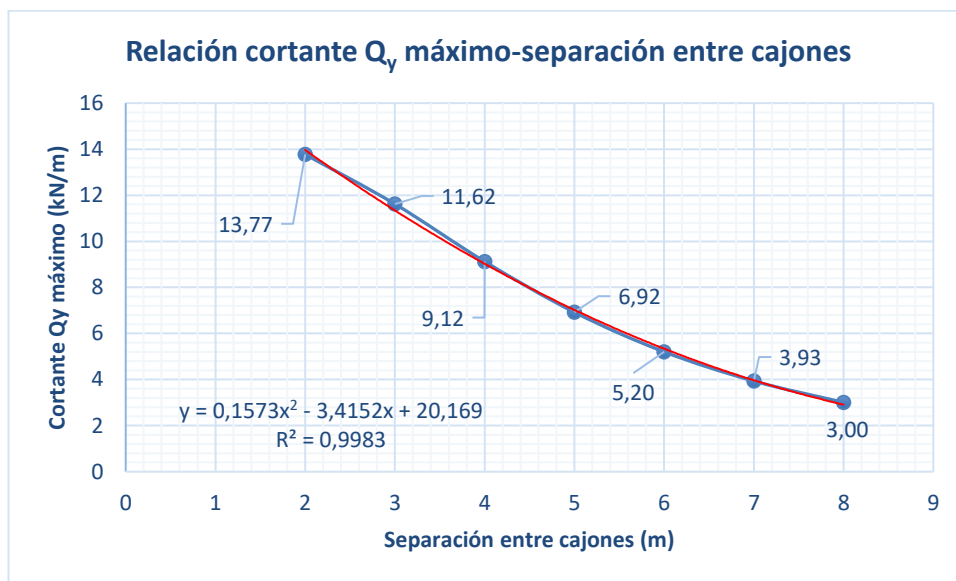


Figura 148: Relación cortante Q_y máximo-separación entre cajones

La distribución del esfuerzo axial N_y , representada en la figura 149, es la que mayor variación sufre con el cambio de separación entre cajones. Mientras que para una separación igual a 2 metros se tienen axiles transversales positivos (de compresión) en toda la luz del puente, al aumentar la distancia de separación, los axiles van disminuyendo. De esta forma, con una separación de 3 metros, se llegan a dar tracciones en la zona central, y dicha zona de tracciones aumenta al incrementar la longitud de separación.

Por ejemplo, para una separación de 7 metros, comienzan a aparecer tracciones en la sección $x=12.75m$, mientras que, para el modelo de 3 metros de separación, no aparecen tracciones hasta la sección $x=18.75m$.

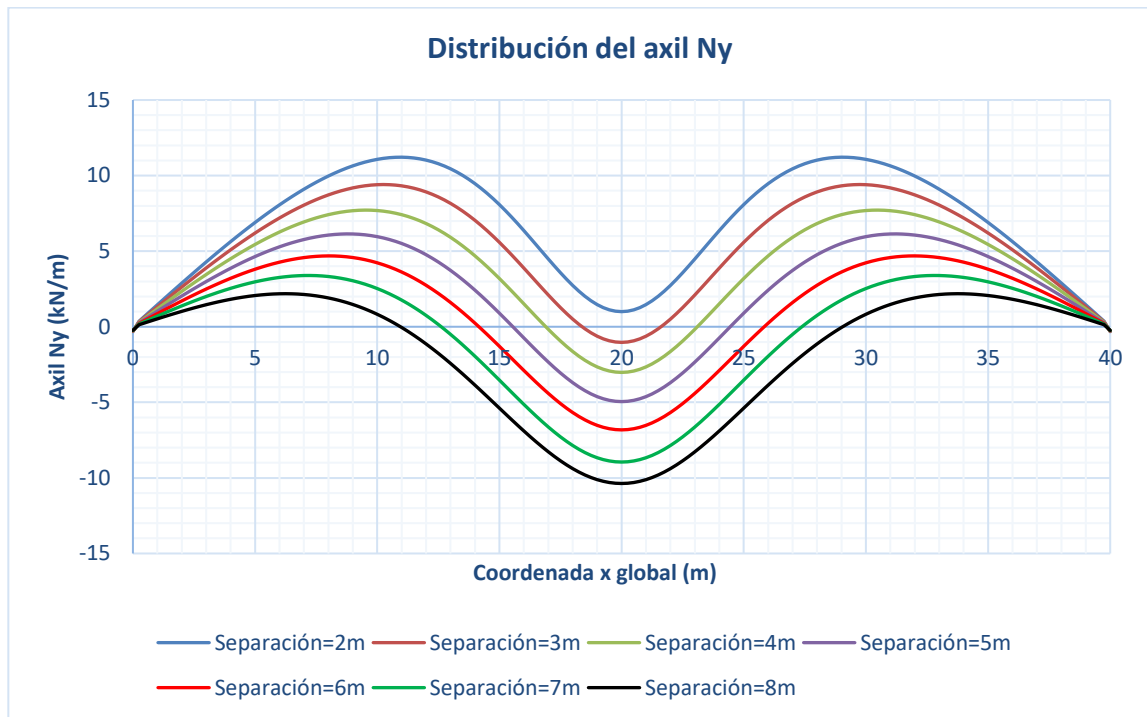


Figura 149: Distribución del momento Q_y para los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones

Para analizar el cambio que produce la variación de la separación entre cajones en los valores máximos del axil transversal N_y , se ha obtenido, para cada modelo del caso 4, tanto el valor máximo negativo (tracción) como el valor máximo positivo (compresión). El axil máximo de tracción aumenta al incrementar la longitud entre cajones, mientras que el axil máximo de compresión, disminuye.

Es decir, al aumentar la separación entre cajones, se incrementan las tracciones y las compresiones disminuyen, como se ha comentado anteriormente, en la dirección perpendicular al eje del puente.

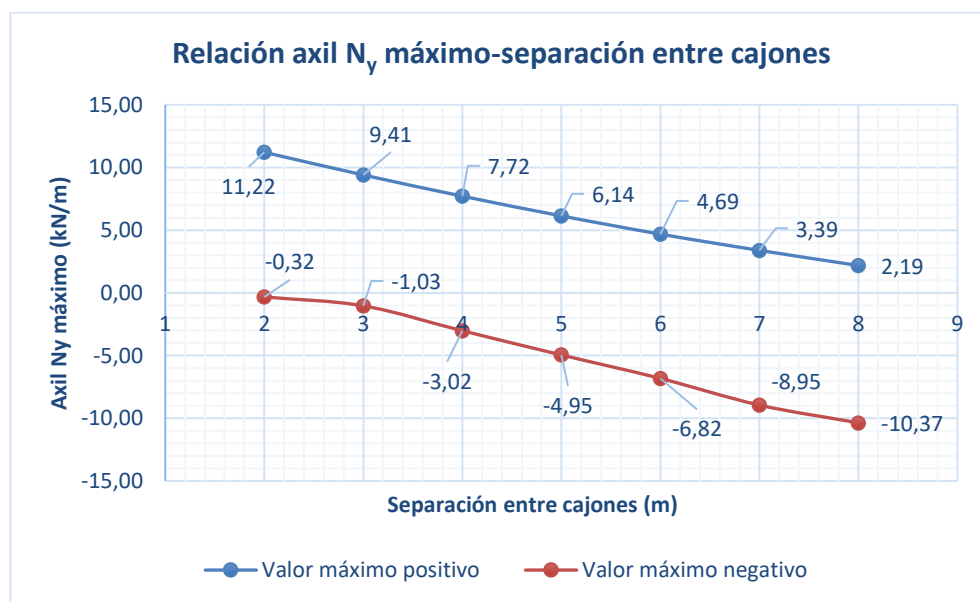


Figura 150: Relación axil N_y máximo-separación entre cajones

Por último, se muestran los cortantes N_{xy} (figura 151). Como se ve, al aumentar la separación entre cajones, se incrementa el valor de los cortantes, hasta una longitud de separación igual a 5 metros. En dicho modelo, se obtienen los valores máximos (en valor absoluto), y a partir de éste, si se sigue aumentando la separación, los

cortantes vuelven a disminuir.

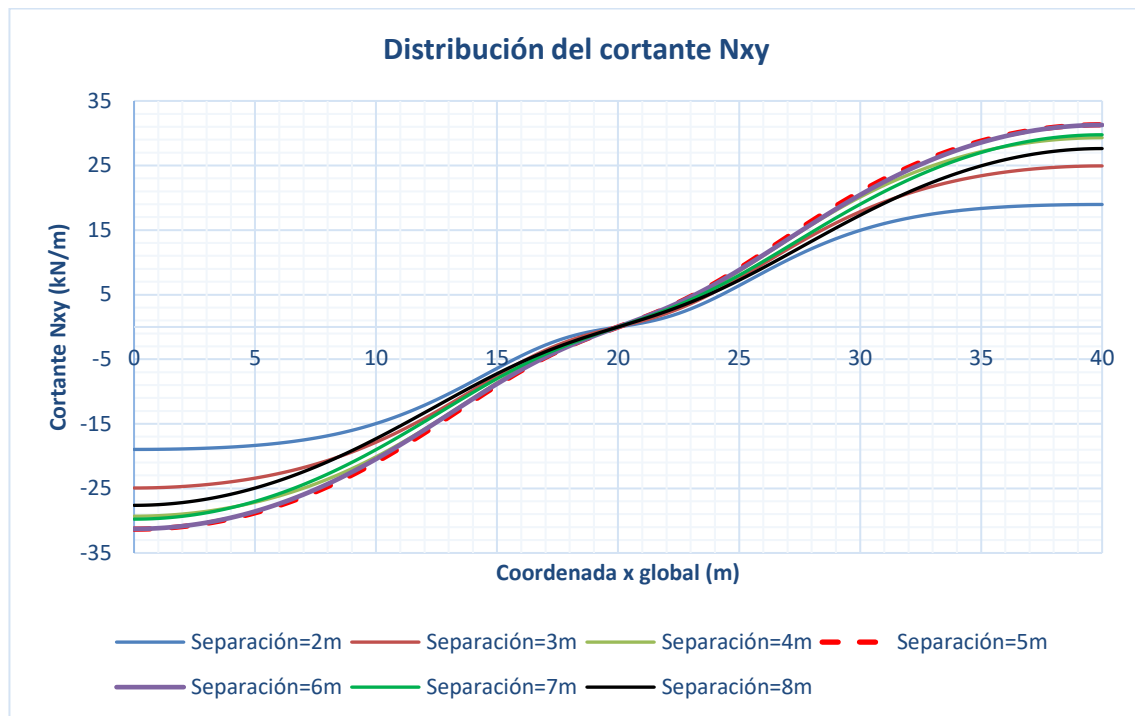


Figura 151: Distribución del momento N_{xy} para los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones

En el párrafo anterior se ha comentado que el valor máximo de N_{xy} se da en el modelo de 5 metros de separación entre cajones, y esto es lo que se pone de manifiesto en la figura 152. Como se aprecia, el valor máximo de N_{xy} aumenta a medida que se incrementa la longitud entre cajones, hasta alcanzar su máximo con una separación de 5 metros. A partir de ese punto, al seguir incrementando la separación entre cajones, el cortante N_{xy} máximo decrece, aunque de forma más suave.

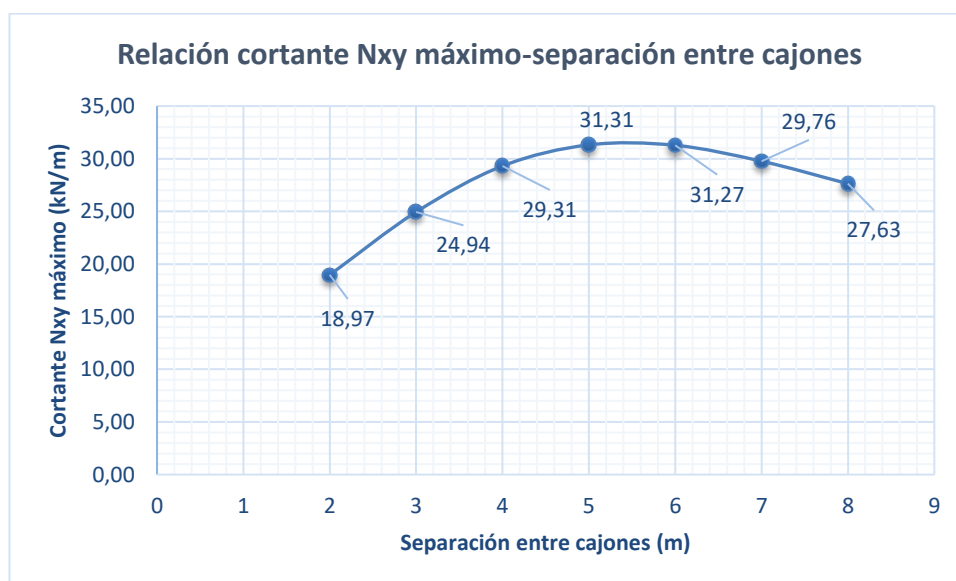


Figura 152: Relación cortante N_{xy} máximo-separación entre cajones

4.4.2.4 Tensiones

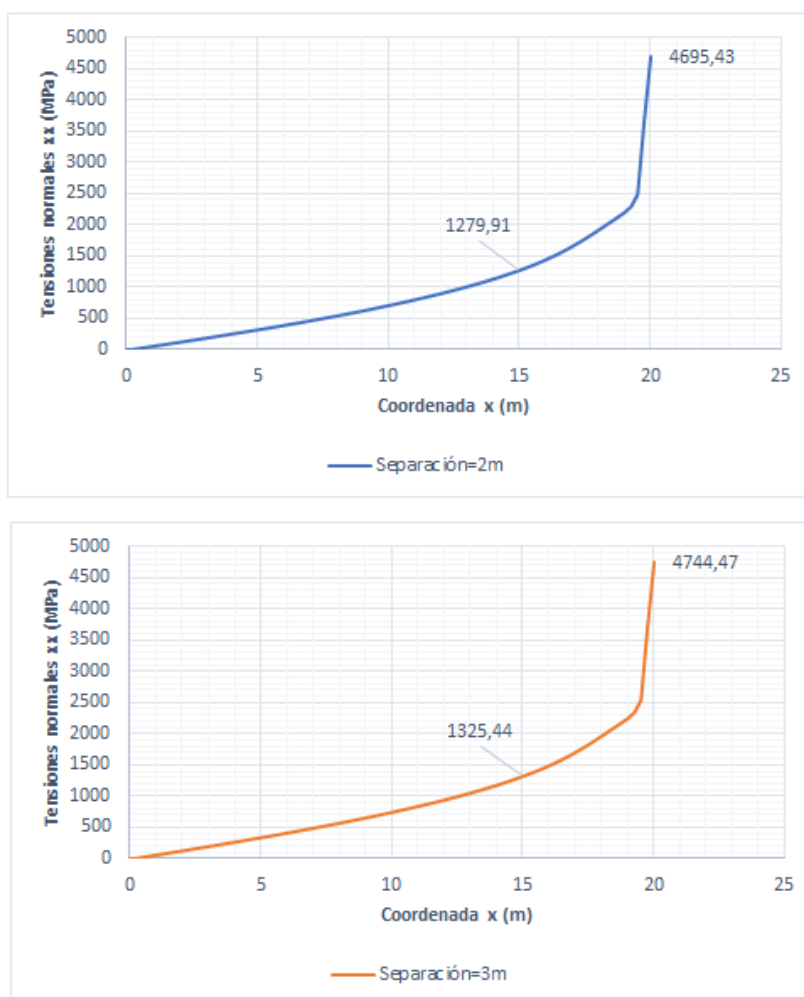
En el presente apartado se verán cómo varía la distribución de tensiones, normales y tangenciales, al cambiar la longitud de separación entre cajones. Como en el apartado anterior, no se exponen los resultados de todos los modelos estudiados, ya que son similares y el mostrarlos todos no aporta información adicional a la que se obtiene con los modelos seleccionados.

4.4.2.4.1 Tensiones normales

En cuanto a las tensiones normales en el nudo 2 a lo largo de la luz, como se ve en la gráfica 153, la variación entre los modelos es mínima. En todos ellos, el valor máximo se produce en la sección central (donde se aplica la carga), y va disminuyendo hasta los extremos, donde se da el valor mínimo. Es decir, la carga puntual produce una gran perturbación en el punto de aplicación, pero ésta se amortigua rápidamente.

Aunque la diferencia que se da es pequeña, se observa que en los modelos con separaciones mayores entre cajones las tensiones son mayores.

Distribución de las tensiones normales en el nudo 2 a lo largo de la luz



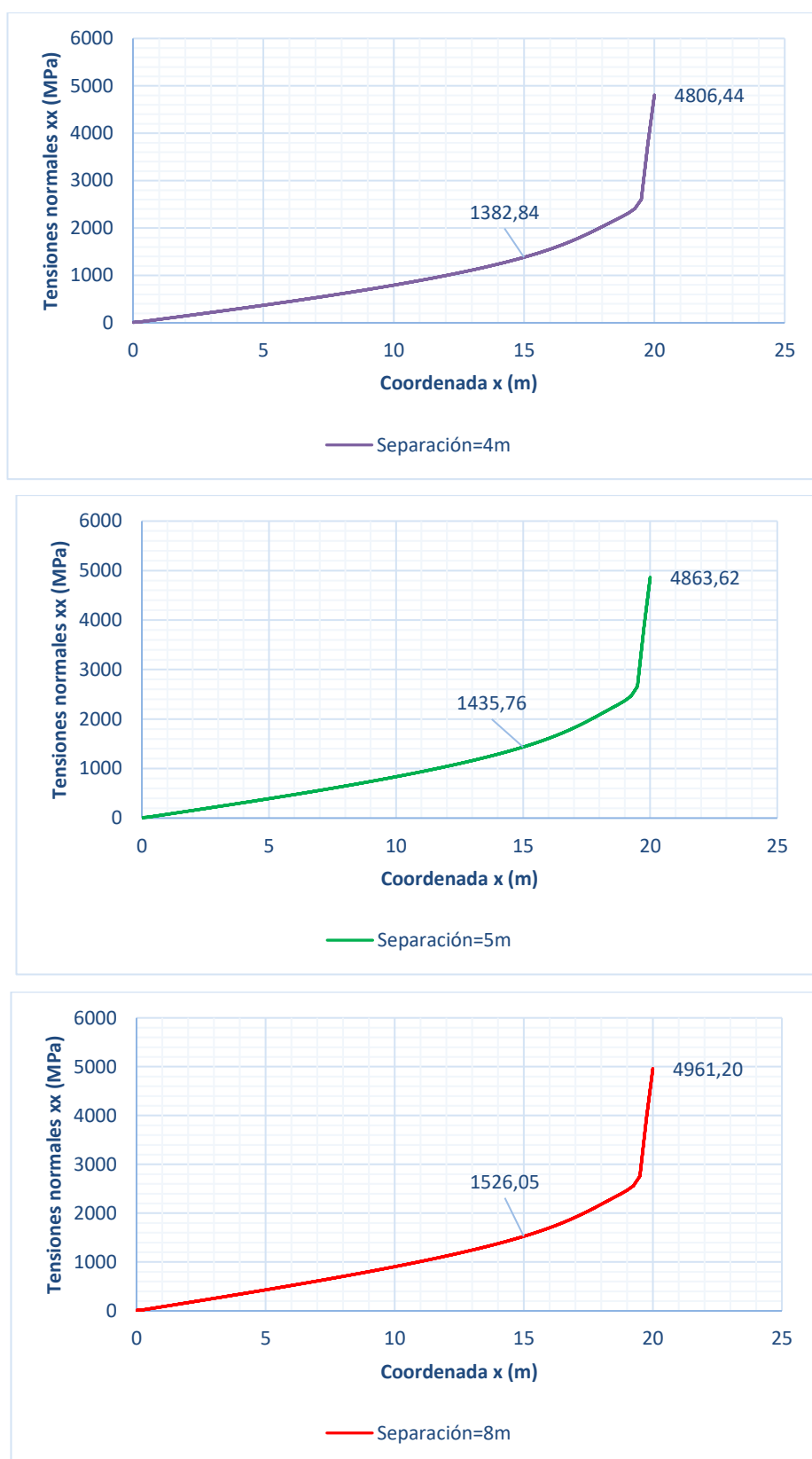


Figura 153: Distribución de σ_{xx} (MPa) en el nudo 2 a lo largo de la luz de los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones

En la siguiente gráfica (figura 154) se representan las tensiones normales en el nudo 3, y como se puede ver, a medida que se aumenta la separación entre cajones, las tensiones son mayores.

Lo mismo ocurre con las tensiones normales en el nudo 5 (figura 155) y en el nudo 6 (figura 156). Además, se

ha ampliado la gráfica en la zona central del vano para ver los valores que se alcanzan en el nudo 5, y se aprecia lo dicho anteriormente en el resto de nudos: el aumento de la separación entre cajones supone un incremento en las tensiones normales, pero dicho incremento es pequeño en relación a la gran variación que se hace en la separación entre cajones.

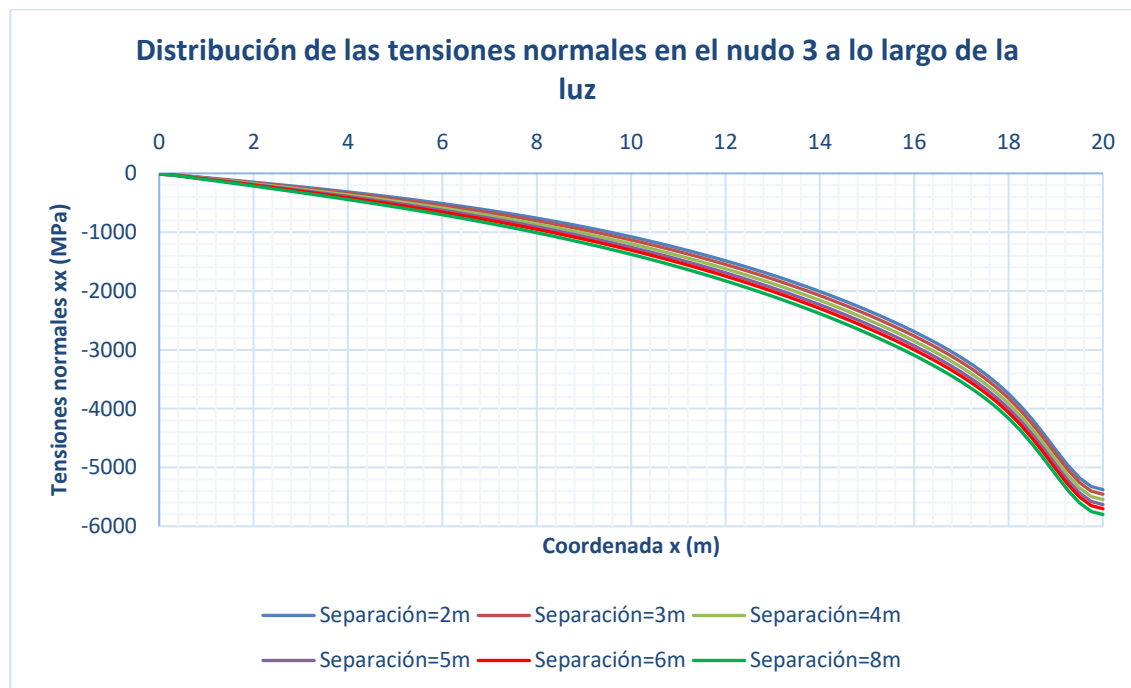


Figura 154: Distribución de σ_{xx} (MPa) en el nudo 3 a lo largo de la luz de los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones

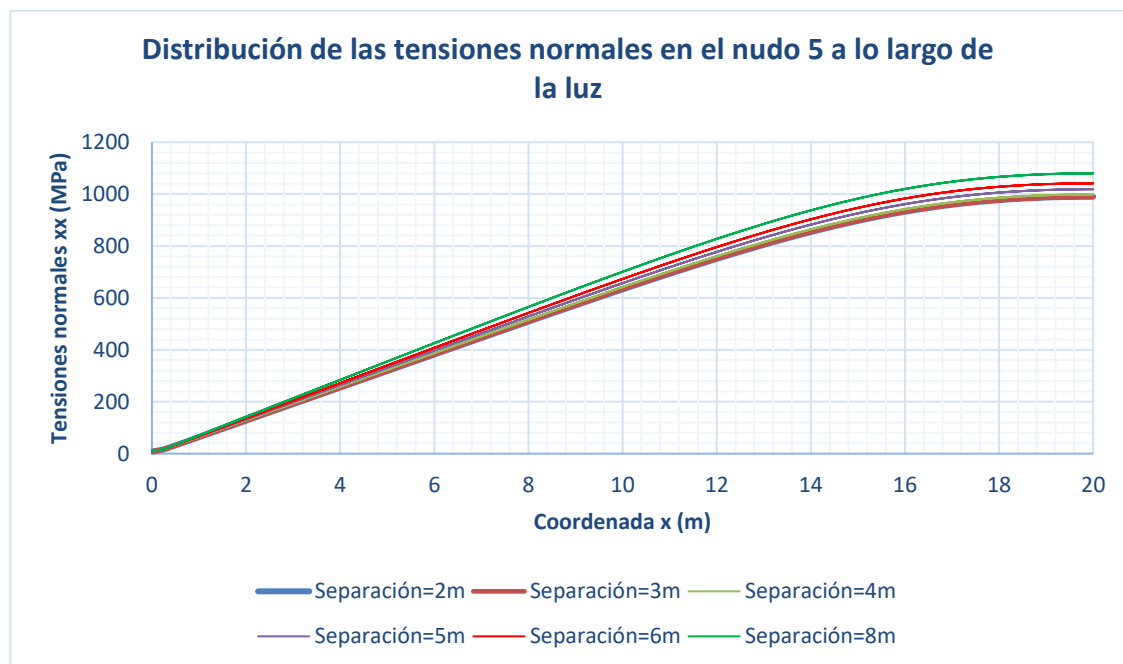


Figura 155: Distribución de σ_{xx} (MPa) en el nudo 5 a lo largo de la luz de los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones

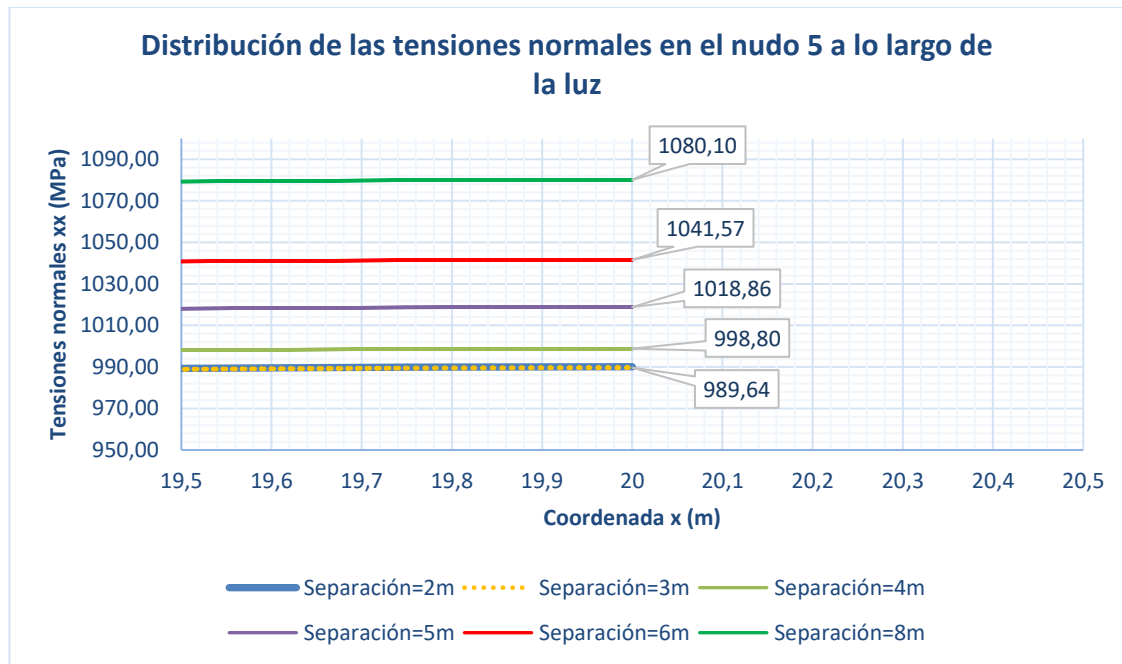


Figura 155.1: Distribución de σ_{xx} (MPa) en el nudo 5 a lo largo de la luz de los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones

Como se observa en la figura 156, las tensiones normales en el nudo 6, las cuales son de tracción en todos los modelos, aumentan al incrementar la separación entre cajones, sobre todo en la zona central del vano, siendo más similares en las secciones cercanas al extremo.

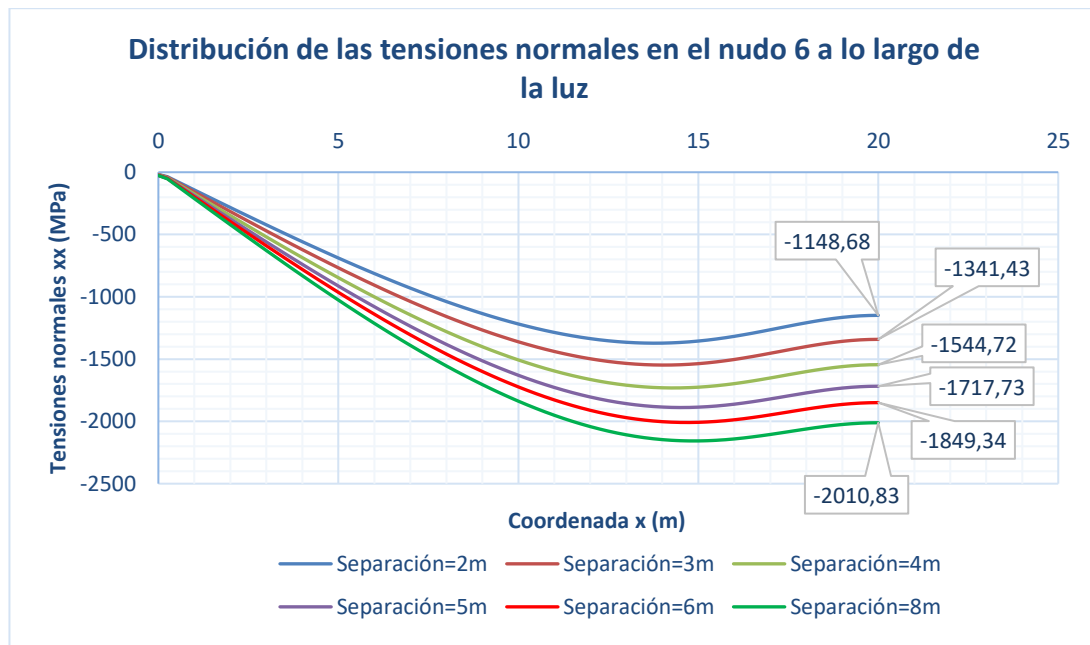


Figura 156: Distribución de σ_{xx} (MPa) en el nudo 6 a lo largo de la luz de los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones

En la siguiente gráfica (figura 157) se observa la evolución de las tensiones normales cuando se varía la separación entre cajones. Se deduce fácilmente que no es mucha la influencia que tiene la variación de esta característica geométrica en el valor de las tensiones máximas. El cambio más significativo se produce en el nudo 6, en el que las tracciones aumentan considerablemente. En el resto de nudos, sin embargo, la variación es mínima en comparación a la longitud que se aumenta la separación.

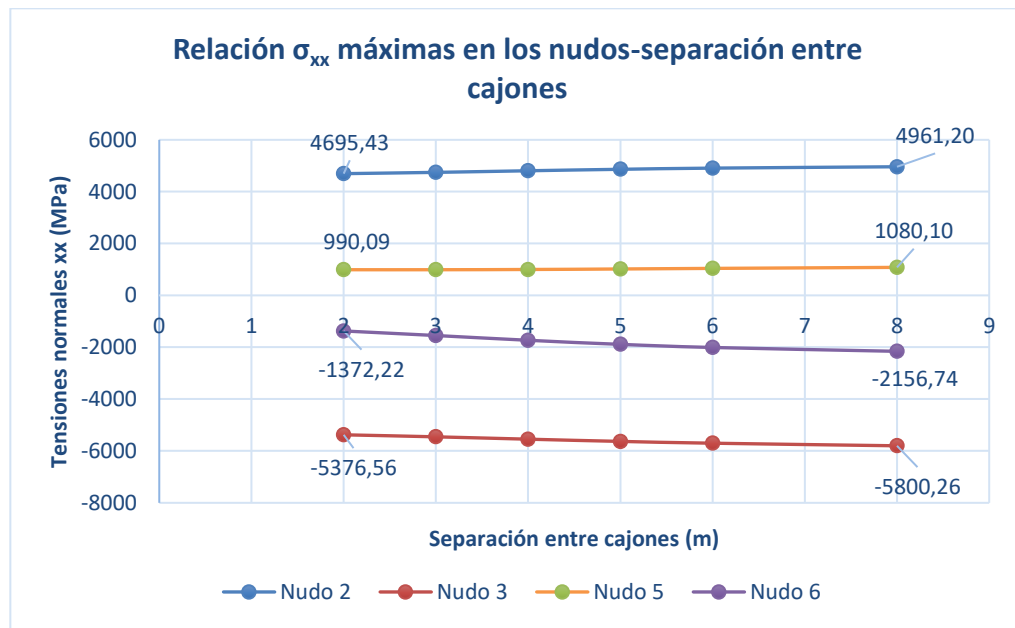


Figura 157: Relación σ_{xx} máximas en los nudos-separación entre cajones

Por último, se incluyen los resultados obtenidos de calcular las tensiones normales en las secciones $x=20\text{m}$ y $x=15\text{m}$ de los modelos de 2 y 8 metros de separación entre cajones. Como se ha comentado, las distribuciones de las tensiones normales entre los modelos son análogas, y éstas disminuyen rápidamente al alejarnos de la sección central.

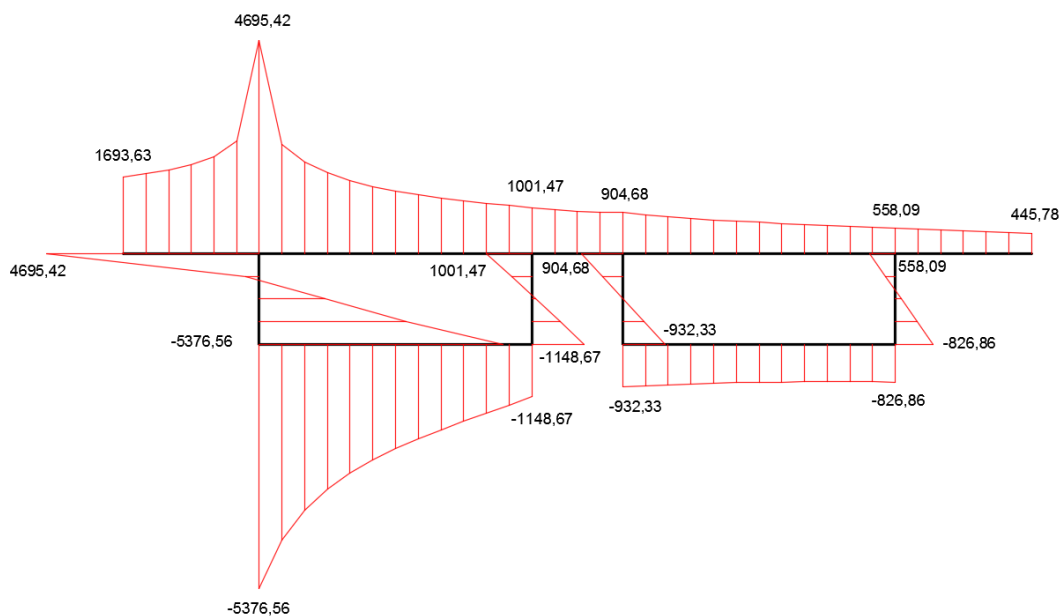


Figura 158: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=20\text{m}$, del modelo de 2 metros de separación entre cajones

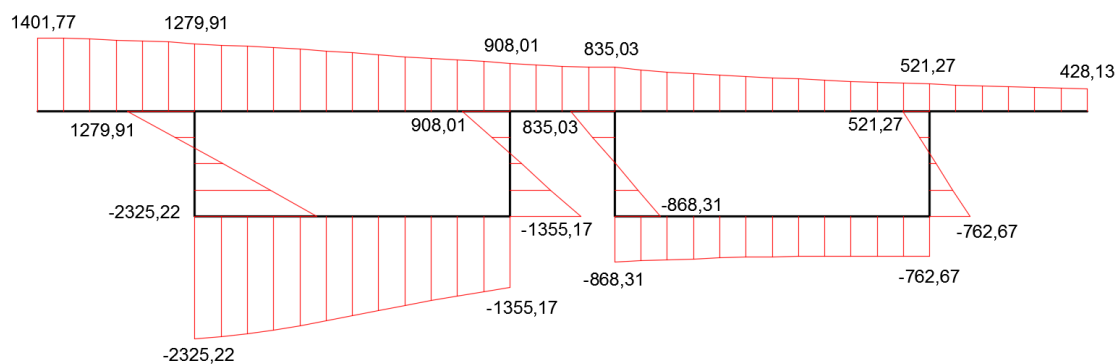


Figura 159: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=15$ m, del modelo de 2 metros de separación entre cajones

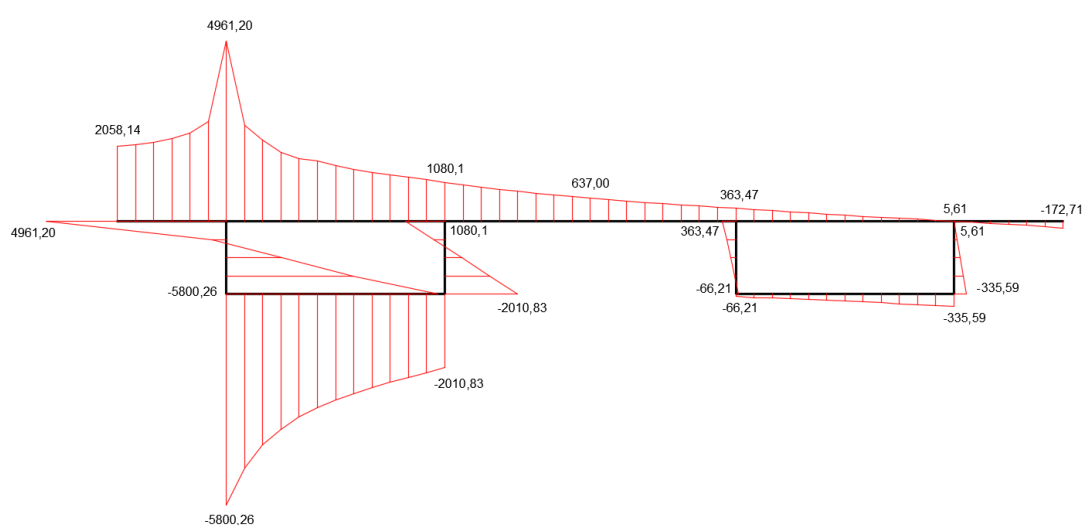


Figura 160: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=20$ m, del modelo de 8 metros de separación entre cajones

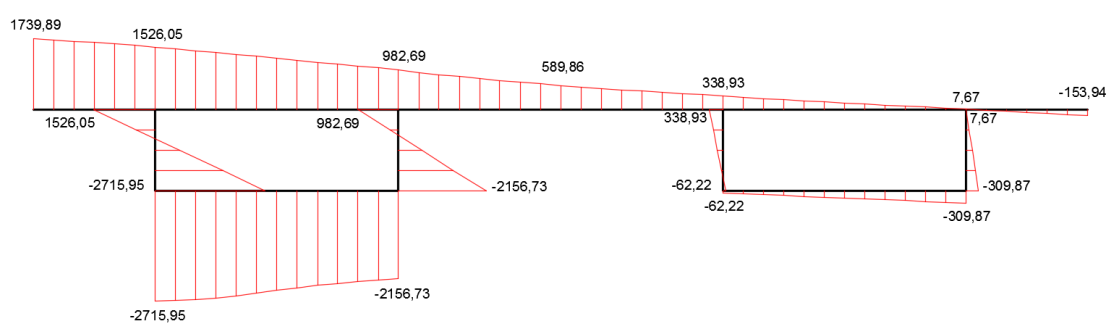


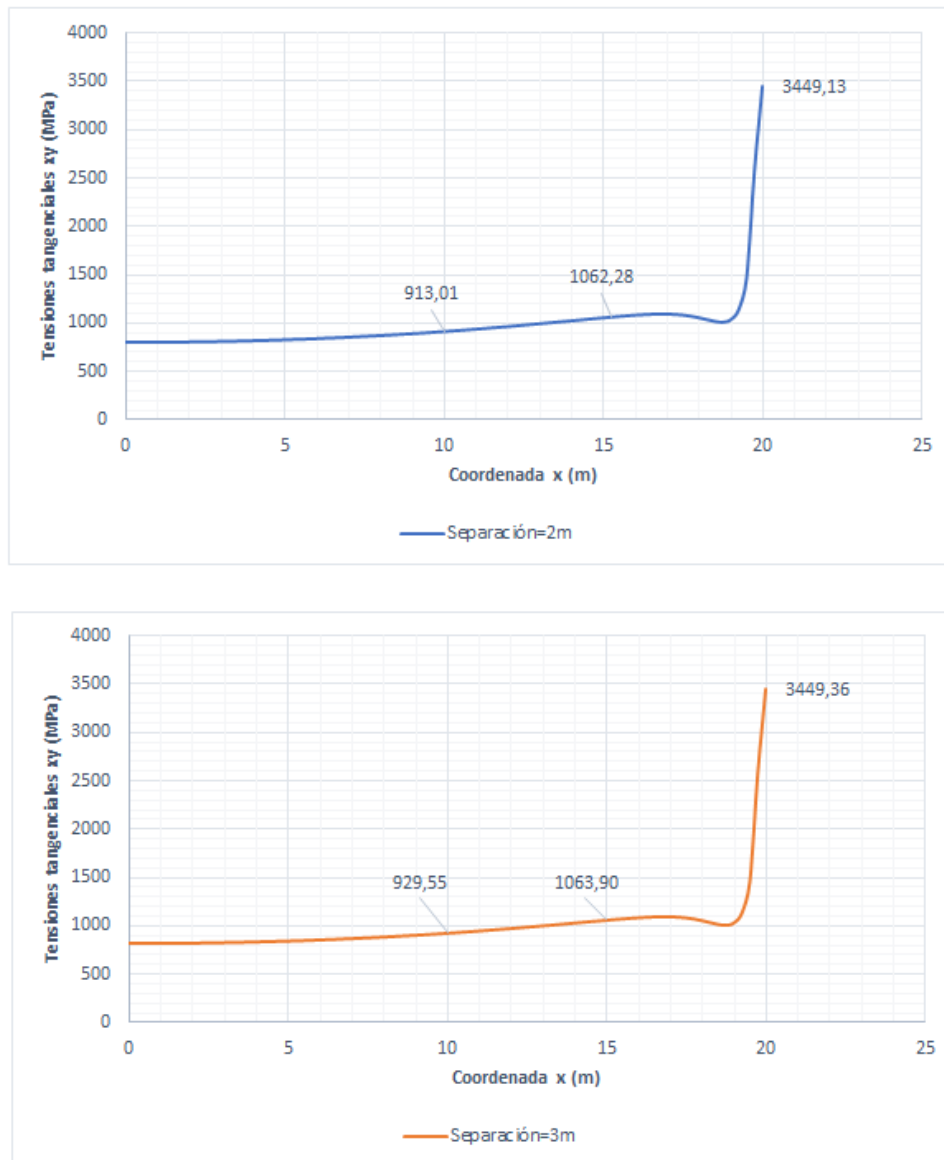
Figura 161: Distribución de σ_{xx} (MPa) en la sección $x=15$ m, del modelo de 8 metros de separación entre cajones

4.4.2.4.2 Tensiones tangenciales

Como en los casos anteriores, la distribución de las tensiones tangenciales en los nudos 2 y 3 son bastante parecidas entre los modelos. Por ello, se han representado en gráficas separadas, y se han señalado los valores alcanzados en diferentes secciones. Los modelos escogidos para representar las tensiones se indican al pie de cada gráfica.

En la figura 162, se ve que la tensión tangencial máxima se alcanza en la sección central, siendo este valor máximo prácticamente igual en todos los modelos.

Distribución de las tensiones tangenciales en el nudo 2 a lo largo de la luz



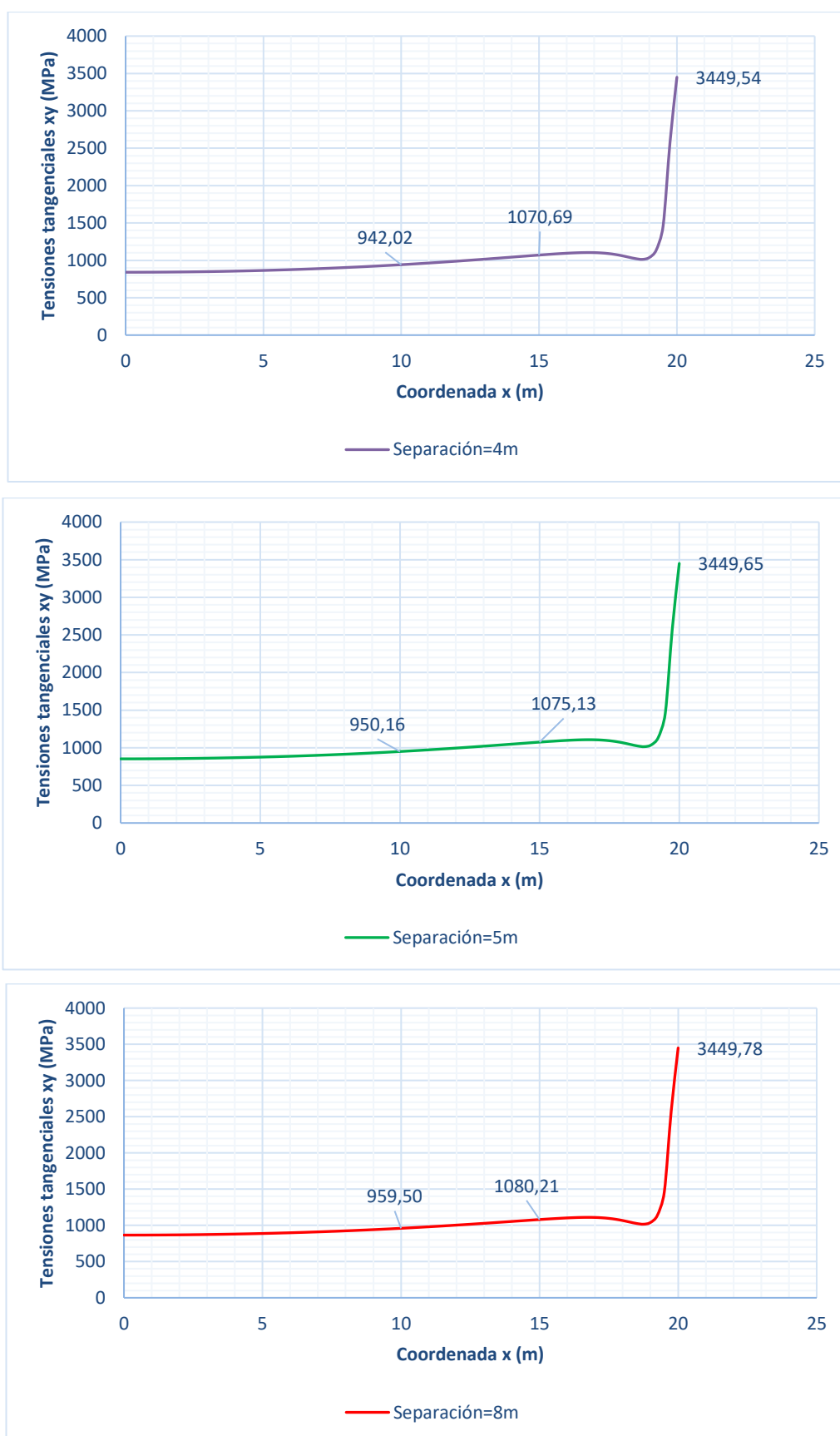
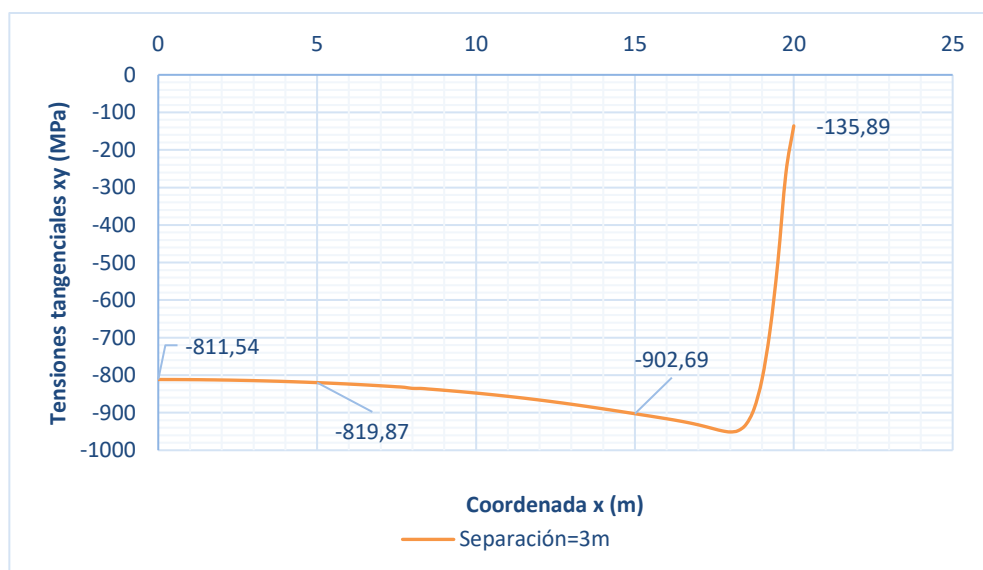
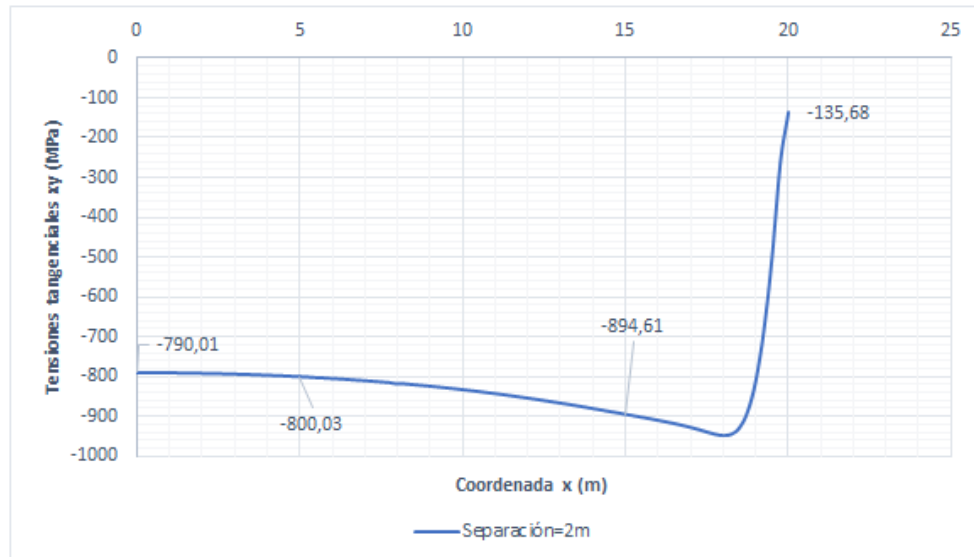


Figura 162: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 2 a lo largo de la luz de los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones

En el caso de las tensiones tangenciales en el nudo 3 (figura 163) se tiene que el valor en la sección central es el mínimo alcanzado (en valor absoluto, ya que se tratan de tensiones negativas). El valor máximo se da en una sección adyacente a la central.

Distribución de las tensiones tangenciales en el nudo 3 a lo largo de la luz



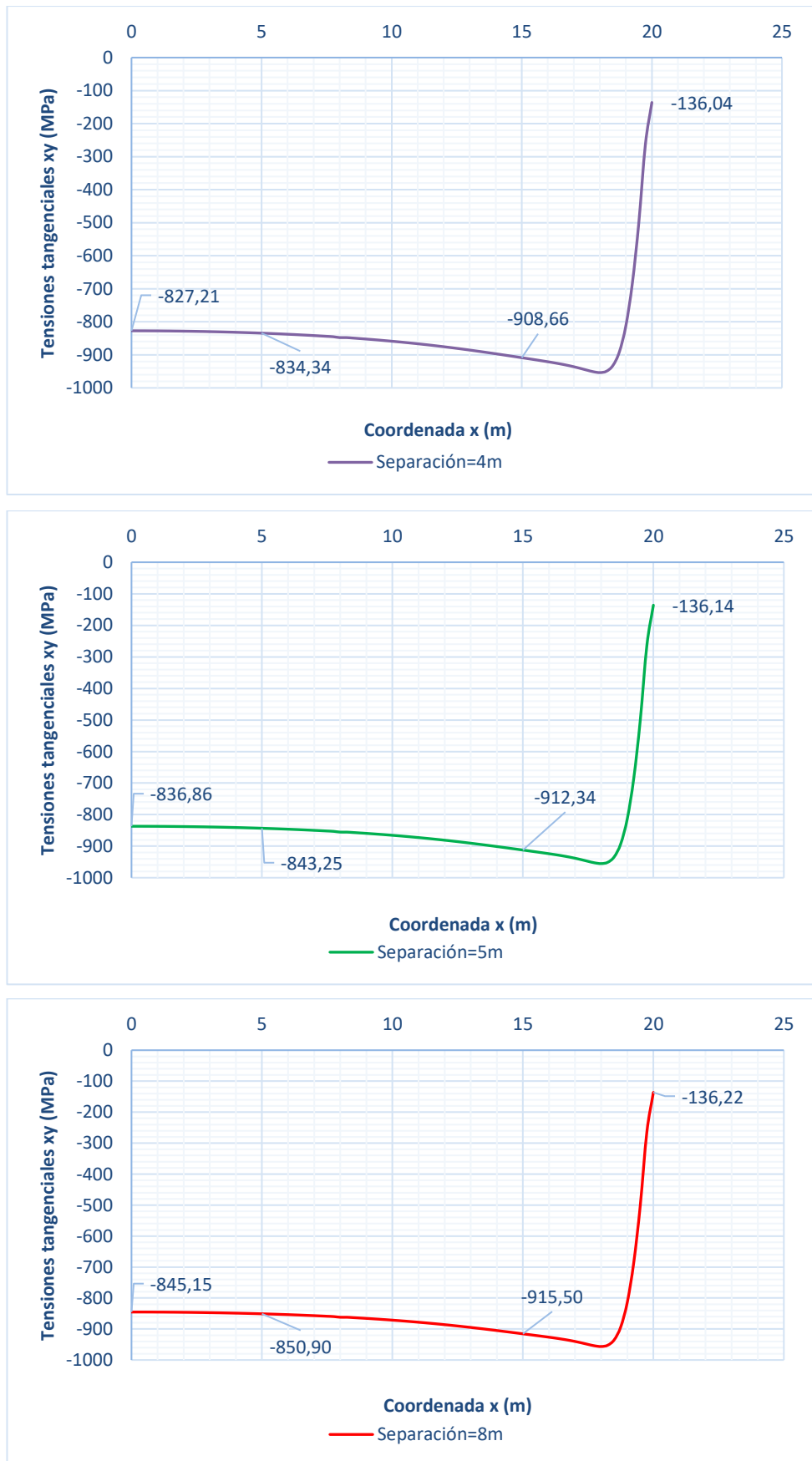


Figura 163: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 3 a lo largo de la luz de los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones

Tomando el modelo de D. Javier Manterola como referencia, en las siguientes gráficas (figura 164 y 165) se ve que las tensiones tangenciales en los nudos 5 y 6 son mayores para separaciones entre cajones superiores a los 6 metros, y menores para longitudes menores que ésta.

En la distribución de las tensiones tangenciales en el nudo 5, como se ha comentado en el párrafo anterior, las tensiones disminuyen al reducir la separación entre cajones, hasta alcanzar valores negativos en el caso de 2 metros de separación entre cajones.

En el modelo de referencia, las tensiones tangenciales en el nudo 6, como se puede ver en la figura 165, no se produce cambio de signo. Al aumentar la separación a 8 metros, se aprecia que en las secciones próximas al apoyo el valor de la tensión se mantiene aproximadamente constante hasta $x=12\text{m}$. Si se disminuye la separación, en la distribución de los modelos con separaciones desde los 4 hasta los 2 metros, aparece un cambio de signo en las tensiones tangenciales antes de alcanzar la sección central.

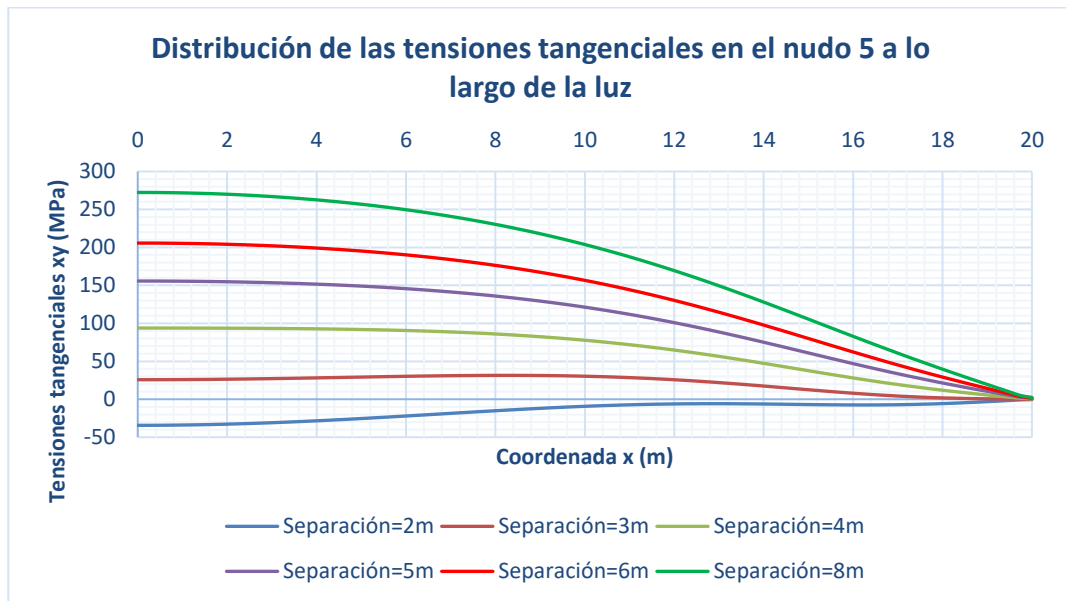


Figura 164: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 5 a lo largo de la luz de los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones

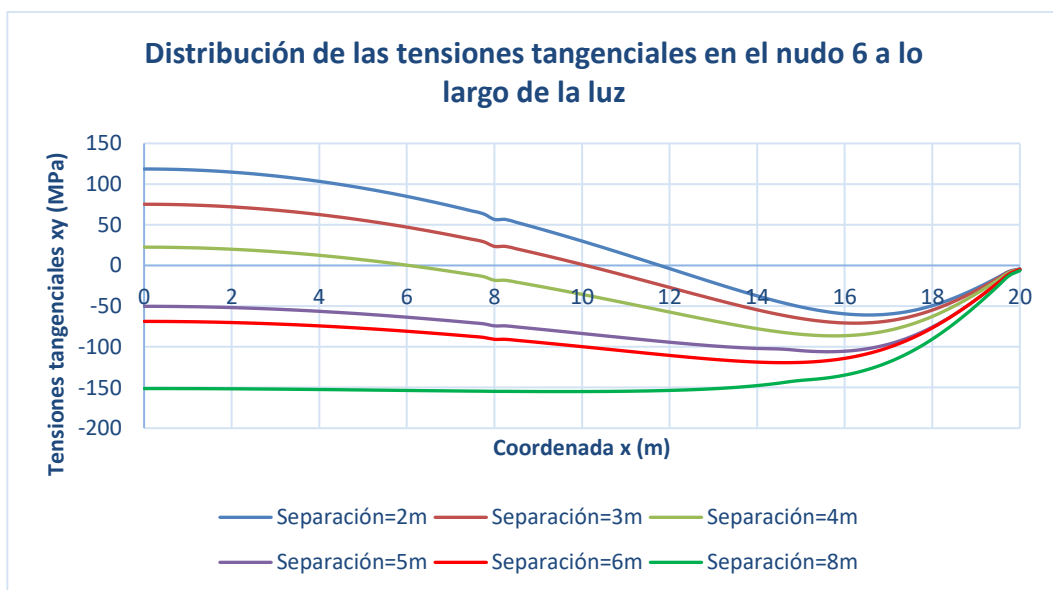


Figura 165: Distribución de τ_{xy} (MPa) en el nudo 6 a lo largo de la luz de los modelos de 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 metros de separación entre cajones

Como se puede ver en la siguiente gráfica (figura 166), la variación de las tensiones tangenciales máximas en los nudos 2 y 3 (ambos pertenecientes al alma cargada) es prácticamente inexistente. Sin embargo, en los nudos 5 y 6, se produce un cambio de signo en el valor de las tensiones τ_{xy} máxima. En el caso del nudo 5, este cambio se produce con una separación entre cajones de 2,5 metros, mientras que en el nudo 6, dicho cambio se da con una separación de 3,5 metros, aproximadamente.

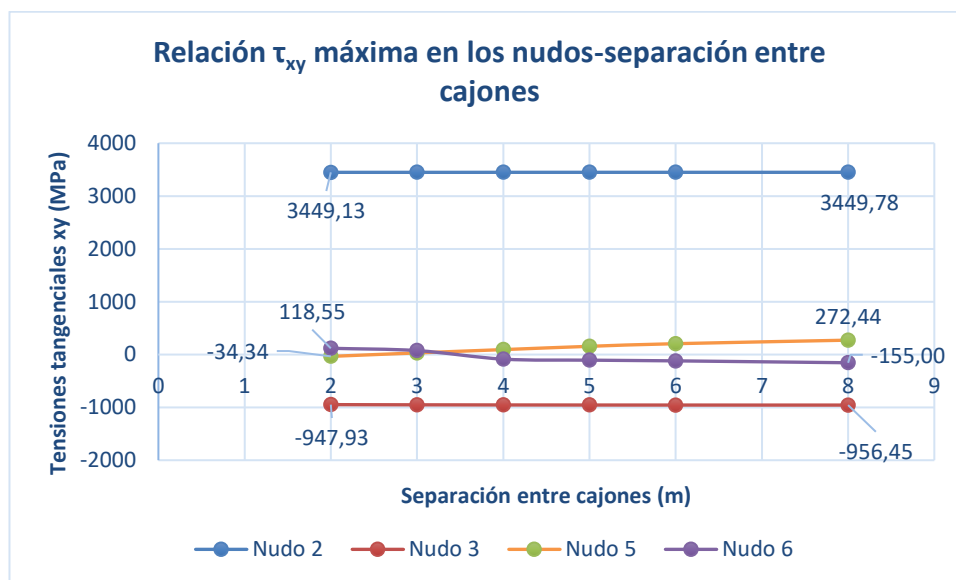


Figura 166: Relación τ_{xy} máxima en los nudos-separación entre cajones

Finalmente, se muestran las tensiones tangenciales que se obtienen en las secciones $x=0\text{m}$ y $x=10\text{m}$ de los modelos de 2 y 8 metros de separación entre cajones. La sección $x=19.5\text{m}$, que es la que analiza D. Javier Manterola en su estudio, no se ha representado ya que no supone una gran variación entre los modelos del caso 4.

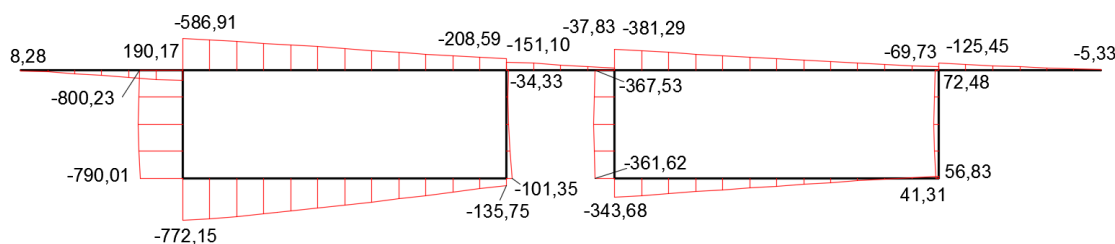


Figura 167: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=0\text{ m}$, del modelo de 2 metros de separación entre cajones

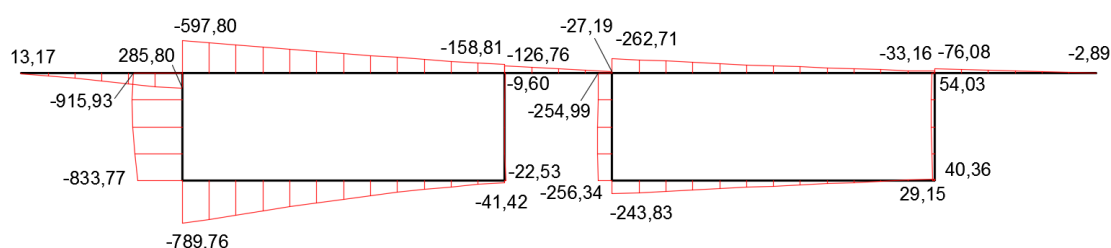


Figura 168: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=10\text{ m}$, del modelo de 2 metros de separación entre cajones

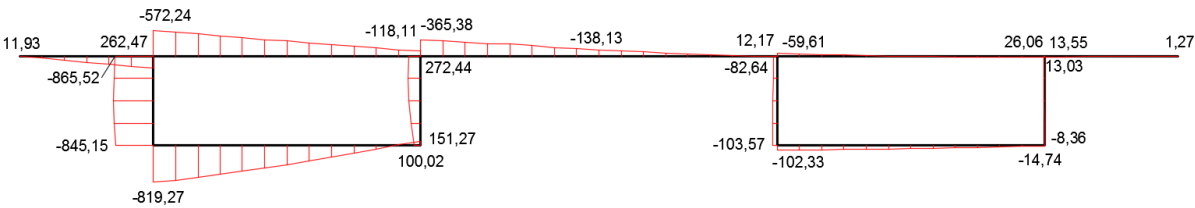


Figura 169: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=0$ m, del modelo de 8 metros de separación entre cajones

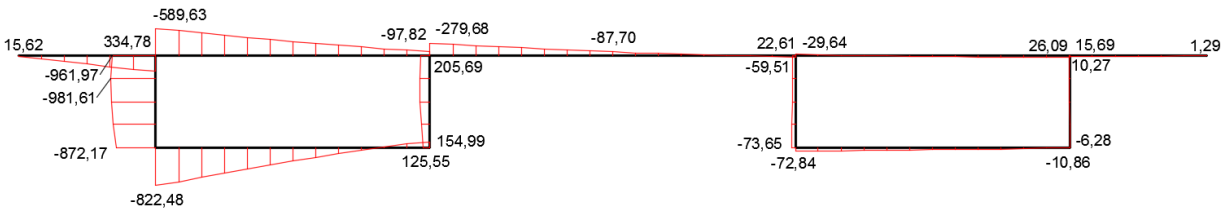


Figura 170: Distribución de τ_{xy} (MPa) en la sección $x=10$ m, del modelo de 8 metros de separación entre cajones

5 CONCLUSIONES Y DESARROLLO FUTURO

En este último capítulo del estudio, se hará una síntesis de las conclusiones a las que se han llegado tras el análisis de los desplazamientos, la distorsión, los esfuerzos y las tensiones en cada uno de los casos.

Por último, se incluye un apartado en el que se expondrán algunas ideas para la continuación del estudio, las cuales no se han realizado debido a la falta de tiempo.

5.1 Conclusiones

En el caso 1 del estudio, se analizó el comportamiento de varios puentes como el que propone D. Javier Manterola en su estudio, pero modificando la luz en cada uno de ellos. Se ha visto que, al aumentar la luz, los desplazamientos también se incrementan. En concreto, la flecha máxima aumenta con la luz al cuadrado. En consecuencia, la distorsión también crece, con pendiente aproximadamente constante en el cajón derecho, y en el caso del cajón izquierdo, manteniéndose constante hasta una luz de 60 metros y aumentando en los siguientes modelos.

Por otro lado, se ha observado que los esfuerzos N_y de tracción, Q_y y M_y también se incrementan con la luz, siendo éste último el de menor cuantía en todos los modelos. Sin embargo, el aumento de la luz no influye demasiado en el axil transversal N_y de compresión, manteniéndose más o menos constante en los modelos estudiados. En cuanto al cortante N_{xy} , sufre una importante disminución cuando se aumenta la luz del puente.

Por último, se ha comprobado el aumento que aparece en las tensiones σ_{xx} al incrementar la longitud del vano, no siendo tan importante la influencia en las tensiones τ_{xy} , las cuales apenas varían en los nudos del alma cargada, aunque sí lo hacen al alejarnos del punto de aplicación de la carga.

En el caso 2, se analizó el comportamiento del puente al variar la inclinación de las almas. Se observó que los desplazamientos son mayores para almas con inclinación entre 40° y 65° , a partir de la cual, siguen disminuyendo, pero de forma más suave. En la distorsión del cajón derecho se observa esta misma evolución. Sin embargo, en el cajón izquierdo, la distorsión decrece hasta que las almas alcanzan la inclinación de 65° , punto donde la función tiene un mínimo.

Mientras que los momentos flectores M_y y los cortantes Q_y disminuyen al aumentar la inclinación de las almas, el comportamiento que se observa en los axiles N_y y en los cortantes N_{xy} es más irregular, dándose sus valores mínimos para unas inclinaciones de 70° y de 50° , respectivamente. Esto se debe a la redistribución la carga que se produce al inclinar las almas, ya que, a menor inclinación, mayor será la tensión normal a soportar por la losa superior y, por lo tanto, menor en los nudos de la losa inferior del cajón izquierdo. Por consiguiente, la tensión tangencial en el punto de aplicación de la carga será mayor cuanto mayor sea la inclinación.

En el tercer caso estudiado, se analizó la influencia del ancho de los cajones. Al aumentar el ancho, se aumenta el ancho total de la sección, haciendo que los desplazamientos del cajón derecho sean cada vez menores. Ésta disminución también se observa en el valor de la flecha máxima hasta el modelo con ancho de cajón igual a 4.5 m, a partir del cual, se mantiene más o menos constante para el resto de modelos. Al igual que en el segundo caso, mientras que la distorsión del cajón derecho disminuye al incrementar el ancho de los cajones, la del cajón izquierdo alcanza un valor mínimo con cajones de 4 metros de ancho. Es decir, para anchos menores y mayores a los 4 metros, la distorsión es mayor.

En cuanto a los esfuerzos, los valores máximos del cortante N_{xy} y del axil de compresión N_y se mantienen aproximadamente constantes en todos los modelos, mientras que los momentos M_y aumentan (produciéndose un cambio de signo) y el cortante Q_y y el axil de tracción N_y disminuyen al incrementar el ancho de los cajones. Esto se traduce en una disminución de las tensiones σ_{xx} (tanto de tracción como de compresión) al aumentar la anchura de los cajones, y en una casi imperceptible variación de las tensiones tangenciales.

En cuarto y último caso estudiado, el análisis se hizo variando la separación entre cajones. Al igual que en el caso 3, al aumentar esta separación, se aumenta el ancho de la sección, por lo que los desplazamientos en el cajón derecho disminuyen bastante para los modelos con mayores separaciones. Se ha visto también que la flecha máxima aumenta con la separación entre cajones, pudiéndose aproximar con una función cuadrática. En este caso, la diferencia entre las distorsiones del cajón derecho y del izquierdo se mantiene constante en todos los modelos del estudio, reduciéndose su valor al aumentar la longitud de separación entre cajones.

Tanto los momentos flectores M_y , como los cortantes Q_y , y los axiles N_y de tracción y de compresión, sufren una clara disminución con el incremento de la separación entre cajones. En cambio, el valor máximo del cortante N_{xy} aumenta para los modelos entre 2 y 5 metros de separación, donde alcanza su máximo. En los modelos siguientes (separación desde los 5 hasta los 8 metros), este valor máximo disminuye. Por último, se ha visto que, al incrementar la separación, aumentan las tensiones normales y, en cuanto a las tensiones tangenciales, la variación de este parámetro no afecta demasiado al alma cargada, aunque sí al alma derecha del cajón izquierdo, y más aún al alejarnos del punto de aplicación de la carga.

Por lo tanto, como se expuso al principio de este trabajo, la finalidad del estudio era conocer el comportamiento de un puente formado por dos vigas cajón, variando algunas características geométricas del mismo. Así, cumpliendo el objetivo marcado, damos por concluido el estudio.

5.2 Desarrollo futuro

Como se comentó al principio de este capítulo, a continuación, se exponen algunas ideas en relación a la continuación del estudio, las cuales no se han podido llevar a cabo debido a la falta de tiempo.

En primer lugar, el siguiente paso al análisis realizado sería estudiar el comportamiento del puente (desplazamientos, distorsión, esfuerzos y tensiones) moviendo la carga puntual a lo largo de la sección transversal, a la vez que se varían los parámetros geométricos escogidos para el presente estudio. En el capítulo V de su libro, D. Javier Manterola presenta un estudio como éste, pero sin variar la geometría del puente, por lo que se podrían comparar los resultados obtenidos con los de dicho estudio (al igual que se ha hecho en este trabajo).

En segundo lugar, se podría repetir el estudio realizado, pero con una carga distribuida, variando las características geométricas del puente. Al igual que en el caso anterior, D. Javier Manterola recoge este estudio (sin modificar la geometría) en su libro, por lo que se tendría también un modelo de referencia.

En mi opinión, estos estudios resultarían de gran interés ya que la sección en cajón presenta muchas ventajas, por lo que conviene conocer su comportamiento de la forma más exacta posible, ante cualquier carga, para así poder aprovechar sus virtudes al máximo.

En último lugar, el estudio se podría realizar con otros materiales, usando secciones metálicas o mixtas. De esta forma, conociendo el comportamiento de los materiales, se podría optimizar en el dimensionamiento de la sección. Como se ha visto, los valores máximos de los esfuerzos se dan en zonas muy localizadas por lo que, conociendo el comportamiento de este tipo de puentes se podrían optimizar la cantidad de materiales usados. Además, se podría estudiar si los fenómenos particulares que se han visto a lo largo de este estudio se podrían reducir usando secciones metálicas o mixtas.

REFERENCIAS

- [1] Puentes. Apuntes para su diseño, cálculo y construcción – Javier Manterola (2006)
- [2] Trabajo de Fin de Grado 'Análisis de sensibilidad a la inclinación de las almas en las secciones tipo cajón en puentes' – Sergio Cobo Pérez
- [3] Midas Civil
- [4] Microsoft Excel
- [5] AutoCAD